

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інженерно-фізичний факультет

Кафедра фізики металів

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Світлана ВОЛОШКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Фізичне матеріалознавство»

спеціальності 132 «Матеріалознавство»

**на тему: «Формування зміцненого шару на сталі 40Х електроіскровим
легуванням Cr та W»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ФМ-61-1

Фоменко Ольга Володимирівна

Керівник:

доцент, к.т.н.,

Іващенко Євген Вадимович

Консультант з економічно-організаційної частини:

к.е.н., ст. викладач Нараєвський С. В.

Консультант з охорони праці:

д.т.н., професор Левченко О. Г.

Консультант з нормоконтролю:

ас. Шаповалова Н. А.

Рецензент: к.т.н., доцент Бобіна М. М.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інженерно-фізичний факультет

Кафедра фізики металів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Фізичне матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Світлана ВОЛОШКО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Фоменко Ользі Володимирівні

1. Тема роботи «Формування зміцненого шару на сталі 40Х електроіскровим легуванням Cr та W», керівник роботи Іващенко Євген Вадимович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «21» травня 2020 р. № 1132-с

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: результати переддипломної практики, літературні дані за темою дослідження.

4. Зміст роботи:

- 1) Дослідити структуру, мікротвердість, фазовий склад, кінетику масоперенесення та зносостійкість поверхневих шарів сталі 40Х після електроіскрового легування (ЕІЛ) за схемами W - Cr та Cr - W.
- 2) Виявити вплив матеріалів анодів (вольфраму, хрому) у процесі пошарового ЕІЛ на структуру та властивості поверхні сталі 40Х.
- 3) Визначити економічну доцільність дослідження.
- 4) Проаналізувати шкідливі фактори та способи їх усунення.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): фото мікроструктур поверхневої зони сталі 40Х після ЕІЛ у послідовності W - Cr та Cr - W; дифрактограми W - Cr, Cr - W покриттів на

сталі 40Х; кінетичні криві масоперенесення у процесі ЕІЛ; криві інтенсивності зношування легованих покриттів та зразка сталі 40Х без обробки; презентація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічно-організаційна частина	к.е.н., ст. викладач Нараєвський С. В.		
Охорона праці	д.т.н., професор Левченко О. Г.		
Нормоконтроль	ас. Шаповалова Н. А.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Видача завдання	13.04.2020	
2.	Огляд джерел та написання літературного огляду	14.04.2020-27.04.2020	
3.	Освоєння методики дослідження	27.04.2020-30.04.2020	
4.	Виконання експериментальних досліджень	01.05.2020-11.05.2020	
5.	Отримання результатів та їх обговорення	11.05.2020-15.05.2020	
6.	Написання висновків та переліку посилань	16.05.2020-20.05.2020	
7.	Оформлення роботи	21.05.2020-09.06.2020	
8.	Попередній захист	09.06.2020	
9.	Захист на засіданні ЕК	16.06.2020	

Студент

Ольга ФОМЕНКО

Керівник

Євген ІВАЩЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 72 с., 9 табл., 25 рис., 48 джерел.

ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, СТАЛЬ 40Х, ЗМІЦНЕННЯ,
ЛЕГОВАНІЙ ШАР, ВОЛЬФРАМ, ХРОМ.

Об'єкт дослідження – поверхневі шари сталі 40Х, отримані електроіскровим легуванням анодами вольфраму та хрому на повітрі.

Мета роботи – дослідження будови та властивостей поверхневих шарів сталі 40Х після електроіскрового легування (ЕІЛ) вольфрамом та хромом у різній послідовності.

Методи дослідження – мікроструктурний, мікродюрOMETричний, гравіметричний, рентгеноструктурний, випробовування на зносостійкість.

Показана можливість формування зміцнених покриттів електроіскровим легуванням сталі 40Х за схемами W - Cr та Cr - W (з мікротвердістю до 6,3 ГПа - 10,5 ГПа) товщиною від 24 мкм до 32 мкм.

Встановлено вплив послідовності нанесення вольфраму та хрому під час електроіскрового легування сталі 40Х на поверхневу мікротвердість та зносостійкість, фазовий склад та структуру модифікованого шару, кінетику його утворення.

Виявлено, що найбільшу мікротвердість (10,5 ГПа) та зносостійкість (у 7,3 рази більше, ніж необробленого зразка) має легований шар після ЕІЛ сталі в послідовності W - Cr, а найбільшу товщину (32 мкм) – при послідовності Cr - W.

Практичне значення: одержані в роботі результати та з'ясовані закономірності формування структури та характеристик модифікованих шарів під час електроіскрового легування можуть бути застосовані для подовження строку експлуатації деталей машин та механізмів підвищеної міцності.

ABSTRACT

Diploma work: 72 p., 9 tab., 25 fig., 48 sources.

**ELECTRIC-SPARK ALLOYING, STEEL MARK 40X, HARDENING,
ALLOED LAYER, TUNGSTEN, CHROME.**

The object of the study is the surface layers of 40X steel obtained by electro-spark doping with tungsten and chromium anodes in air.

The aim of the work is to study the structure and properties of the surface layers of 40X steel after electro-spark alloying (ESA) with tungsten and chromium in different sequences.

Research methods - microstructural, microdurometric, gravimetric, X-ray, wear resistance test.

The possibility of forming reinforced coatings by electro-spark alloying of 40X steel according to W - Cr and Cr - W schemes (with microhardness up to 6.3 GPa - 10.5 GPa) with a thickness from 24 μm to 32 μm is shown.

The influence of the sequence of application of tungsten and chromium during electro-spark alloying of 40X steel on the surface microhardness and wear resistance, phase composition and structure of the modified layer, the kinetics of its formation have been established.

It was found that the highest microhardness (10.5 GPa) and wear resistance (7.3 times greater than the untreated sample) has an alloy layer after ESA steel in the sequence W - Cr, and the greatest thickness (32 μm) in the sequence Cr - W.

Practical significance: the results obtained in the work and the regularities of the formation of the structure and characteristics of the modified layers during electro-spark alloying can be used to extend the service life of machine parts and mechanisms of high strength.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1 Загальні відомості про ЕІЛ.....	10
1.2 Суть методу електроіскрової обробки.....	11
1.3 Модель ЕІЛ за теорією Лазаренків.....	13
1.4 Модель ЕІЛ за А. Д. Верхотуровим.....	14
1.5 Формування модифікованих покриттів на сталях з використанням ЕІЛ.....	15
1.6 Використання W та Cr для формування зміцненого шару методом ЕІЛ.....	17
1.7 Електродні матеріали для ЕІЛ.....	17
1.8 Висновки до розділу 1.....	24
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
2.1 Матеріали досліджень.....	26
2.2 Електроіскрове легування.....	27
2.3 Методи, які були використані для дослідження.....	28
2.3.1 Дослідження на зносостійкість.....	28
2.3.2 Гравіметричний аналіз.....	30
2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз.....	31
2.3.4 Рентгенофазовий аналіз.....	32
2.3.5 Мікроструктурний аналіз.....	33
2.4 Висновки до розділу 2.....	34
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	35
3.1 Дослідження зразків після ЕІЛ за схемою W - Cr.....	35
3.2 Дослідження зразків після ЕІЛ за схемою Cr - W.....	38
3.3 Зносостійкість поверхонь сталі 40X після ЕІЛ за схемами W - Cr та Cr - W.....	41
3.4 Порівняльна характеристика шарів, отриманих при ЕІЛ анодами W та Cr.....	42

3.5 Висновки до розділу 3	45
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	46
4.1 Науково-технічна актуальність НДР	46
4.2 Розрахунок витрат на проведення НДР	46
4.2.1 Витрати на оплату праці	47
4.3.2 Єдиний соціальний внесок	48
4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень	49
4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання	49
4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій	49
4.2.6 Витрати на службові відрядження	50
4.2.7 Інші прямі невраховані витрати	50
4.2.8 Накладні витрати	50
4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	51
4.3 Науково-технічна ефективність НДР	51
4.4 Висновки до розділу 4	55
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	56
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів	56
5.1.2 Мікроклімат	57
5.1.3 Шум	58
5.1.4 Освітленість	58
5.1.5 Електробезпека	60
5.1.6 Запиленість та загазованість	61
5.1.7 Виробниче випромінення	61
5.1.8 Пожежна безпека	62
5.2 Висновки до розділу 5	63
ВИСНОВКИ	64
CONCLUSIONS	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	66

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕІЛ – електроіскрове легування

ХТО – хіміко-термічна обробка

ОКР – області когерентного розсіювання

ЛШ – легований шар

НДР – науково-дослідна робота

ФЗП – фонд заробітної плати

ЄСВ – єдиний соціальний внесок

T_B – транспортно-заготівельні витрати

B_M – витрати на закупівлю матеріалів та їх транспортування

I_B – інші прямі невраховані витрати

H_B – накладні витрати

$B_{НДР}$ – загальна планова кошторисна вартість НДР

B – бальна оцінка ефективності НДР

$E_{НДР}^y$ – умовний економічний ефект НДР

E_e – коефіцієнт економічної ефективності

НРВ – невикористане рентгенівське випромінювання

ВСТУП

У нинішні часи кожен розуміє, що ресурси нашої планети мають тенденцію закінчуватися, а відходи та відпрацьовані матеріали невпинно забруднюють навколишнє середовище. Тому вимоги до механічних характеристик деталей машин і механізмів постійно зростають. Це стимулює сучасне матеріалознавство шукати нові методи створення покриттів та матеріалів, які будуть більш довговічні та більш екологічні.

Багато деталей використовуються у складних умовах підвищеного стирання та зношування. Це значно скорочує строк їхньої експлуатації та помножує економічні витрати. Тому одним з найважливіших завдань фізичного матеріалознавства завжди було і досі залишається подовження терміну служби та поліпшення механічних характеристик деталей машин і механізмів.

З рішенням цієї задачі успішно справляється метод обробки сталей та сплавів електроіскровим легуванням (ЕІЛ). Це перспективний метод формування шару підвищеної міцності на поверхні готового виробу і поновлення характеристик деталей та інструментів у різних галузях, тому що він опирається на принципи економічної ефективності, доступності матеріалу, екологічності та простоту використання методу. Електроіскровий метод легування заснований на явищі електричної ерозії аноду при пропусканні іскрового розряду та полярному перенесенні продуктів ерозії з анода (легуючого електроду) на катод (деталь) з утворенням поверхневого модифікованого шару.

В даній роботі, на основі аналізу літературних даних та проведених дослідів, розглянуто вплив легуючих елементів (хрому та вольфраму) та послідовності їх нанесення при ЕІЛ на будову та властивості поверхневих шарів сталі 40Х.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Майже в усіх сучасних машинах є деталі, поверхні яких піддаються тертю, так звані спряжені деталі. Це можуть бути шийки колінчатих валів двигунів, зубці шестерень редуктора, внутрішня поверхня циліндрів двигуна внутрішнього згорання, направляючі, повзуни та інші. Такі деталі більше піддаються зносу, тому їх спряжені поверхні тертя мають бути стійкішими до дії корозії, високих температур, тертя, ніж уся деталь.

Останнім часом розвиток технологій у промисловості невідступно пов'язаний з розробкою та втіленням методів модифікації поверхонь тертя, які були б не тільки ефективними, а й більш екологічними. Існує багато способів зміцнення поверхонь деталей, збільшення їх корозійної стійкості та зменшення тертя спряжених поверхонь. Одним із ефективних методів модифікування поверхні деталі або її елементів є електроіскрове легування. Цей метод має певні переваги, наприклад, економічність використання матеріалів, а також за допомогою фізико-хімічних змін поверхневого модифікованого шару деталі збільшує строк служби деталей машин. Якраз електроіскрове легування дозволяє збільшити жорсткість, корозійну стійкість та твердість робочих поверхонь деталей та значно зменшити коефіцієнт тертя. Також цей метод дає змогу провести ремонт і, модифікуючи поверхневий шар, поновити габарити зношеної деталі.

1.1 Загальні відомості про ЕІЛ

У 50-х роках минулого сторіччя подружжям радянських учених Борисом Романовичем і Наталією Іоасафівною Лазаренками був розроблений принципово новий спосіб обробки металів, сплавів та інших струмопровідних матеріалів, а саме – електроіскрове легування (ЕІЛ), відоме зараз у всьому світі, як electric-spark alloying [1].

Метод ЕІЛ базується на явищі електричної ерозії та переміщенні матеріалу анода на поверхню катода (деталі) при виниканні імпульсних (іскрових) розрядів у газовому середовищі (повітрі, азоті, аргоні та ін.) [2].

Даний метод має багато переваг, одна з головних – це локальна обробка поверхні, яка дозволяє легувати поверхню у конкретних місцях з радіусом від долей міліметрів. До основних особливостей ЕІЛ також належать наступні: відсутність необхідності підготовки деталі до обробки, висока адгезія покриття з матеріалом основи, відсутність дії високих температур на весь об'єм деталі під час обробки, широкий асортимент легуючих матеріалів (анодів) та деталей, які можна обробляти (катодів). Обладнання для цього методу має компактні розміри, що дозволяє транспортувати його при наявності такої необхідності.

Електроіскрове легування допомагає вирішити такі задачі, як:

- відновлення геометричних розмірів зношених деталей механізмів та зміцнення поверхонь;
- модифікація фазового та хімічного складу поверхні катода відповідно нагальним потребам;
- зміцнення приповерхневих шарів матеріалу основи [3, 4, 5].

1.2 Суть методу електроіскрової обробки

Досягнення позитивних наслідків обробки ЕІЛ залежить від доцільного вибору анода з урахуванням його фізико-хімічних властивостей, ерозійної стійкості та параметрів обробки, які мають суттєвий вплив на характеристики майбутнього модифікованого шару.

Метод ЕІЛ дає змогу на поверхні, яка потребує обробки, змінити деякі властивості, а саме: збільшити корозійну стійкість, жаро- та зносостійкість, твердість деталей машин і механізмів у результаті формування потрібних хімічних сполук та шарів з необхідною шорсткістю [6].

Сенс електроіскрового легування полягає у впливі імпульсних електричних розрядів на електропровідні матеріали анода та катода. В ході процесу утворюється електричний розряд, що формує на поверхні катода змінні шари. Ці шари з'являються внаслідок дії імпульсів та теплових навантажень в області розряду. Під дією теплових навантажень на поверхні анода проходить ряд некерованих процесів, а саме: дифузні, мікрометалургійні, термомеханічні та інші. Ці процеси стимулюють перемішування матеріалів анода та катода, що підтримує утворення високої зчеплюваності модифікованого шару з основою. Спосіб формування легованої поверхні визначається структурою, складом, властивостями матеріалів анодів і технічними характеристиками процесу електроіскрового легування [7].

На рис. 1.1 зображена загальна схема ЕІЛ. Процес виникає при зближенні анода та катода на відстань, яка дорівнює пробою електроіскрового розряду.

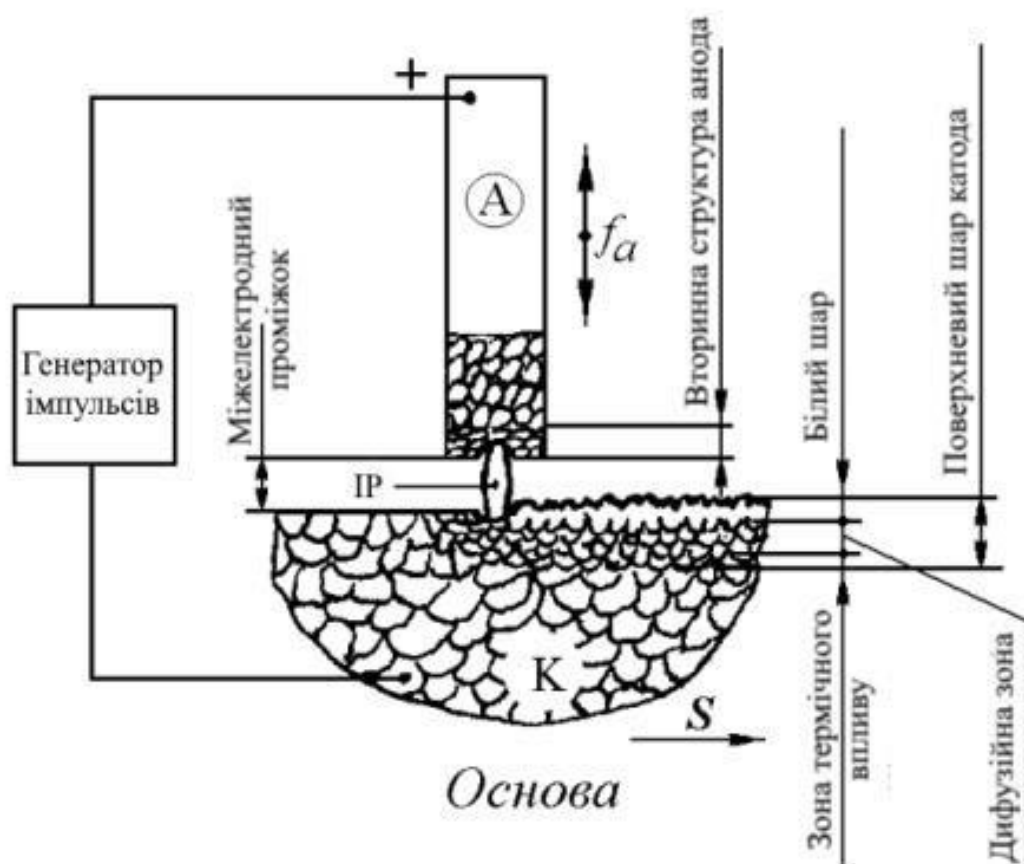


Рисунок 1.1 – Загальна схема процесу ЕІЛ [8]

Коли електроди (анод А та катод К на рис. 1.1) зближуються, зростає напруження електричного поля і при певній відстані стає достатнім для утворення іскрового електричного розряду (ІР).

Унаслідок виникнення ІР шляхом використання енергії, яка попадає від генератора імпульсів, на поверхні формуються і ростуть осередки плавлення та випаровування, які спричиняють електричну ерозію матеріалів електродів.

Коли потік електронів потрапляє на поверхню анода, на якому виділяється велика кількість енергії, він сприяє ерозії цього анода [7]. «Відірвані» частинки попадають на розплавлену поверхню катода та дифундують у глиб матеріалу основи. Цей процес змінює приповерхневу зону катода.

Таким способом на деталі, що оброблювалася, (катоді) формується модифікований шар з новими структурою та властивостями. Використання різних анодів залежно від їх властивостей та фазового стану компонентів ЕІЛ, а також в залежності від температури дозволяє управляти процесом легування на етапі встановлення технічних параметрів ЕІЛ (параметри імпульсних розрядів), що у свою чергу дає можливість формувати поверхневі шари з заданими характеристиками [8].

1.3 Модель ЕІЛ за теорією Лазаренків

Як було зазначено раніше, зменшення відстані між анодом та катодом спричиняє ріст напруженості електричного поля між ними. За допомогою пучка сфокусованого потоку електронів енергія передається поверхневим шарам. Ця енергія використовується на місцевий нагрів матеріалу анода, на часткове випаровування та плавлення. Розплавлений метал «відривається» від аноду та потрапляє на катод. Перебуваючи в полі високої електричної напруженості, крапля розплаву продовжує нагріватися. Коли вона досягає критичної температури, крапля вибухає, що є кульмінацією дії електричного поля.

Внаслідок вибуху на катод потрапляють частинки анода. Коли вони досягають поверхні катода, зварюються з ним та частково дифундують у його поверхню. Далі здійснюється удар анода по поверхні катода, який уже містить частинки розплаву. В результаті цієї дії виникає перемішування та гомогенізація легованого шару.

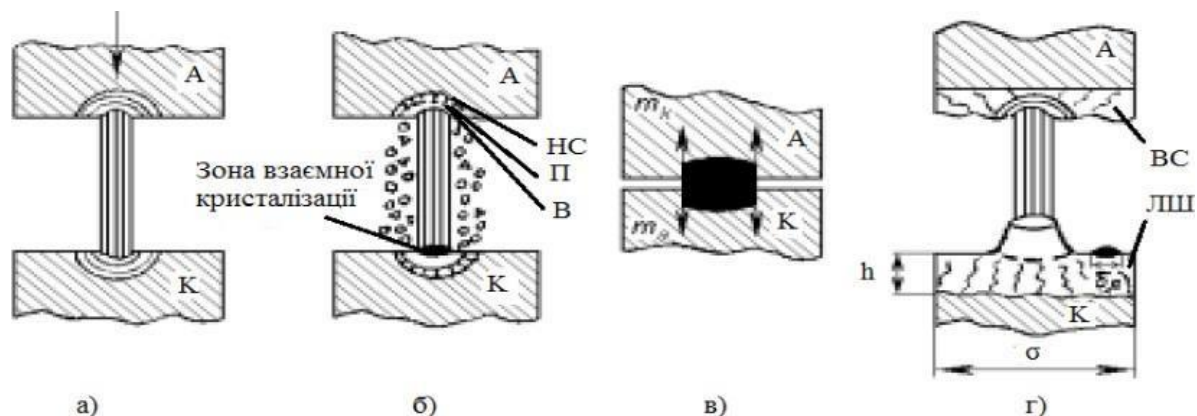
Описаний процес електроіскрового легування відбувається при високих напругах. Для менших напруг (від 100 В до 200 В) пробій здійснюється майже при контакті анода з поверхнею катода. Під час ЕІЛ завжди має місце можливість зворотного масоперенесення. Якщо це відбувається, то з поверхні катода відривається частина матеріалу та переноситься на анод. На поверхні зразка (катода) в цьому випадку утворюється кратер.

Оскільки запропонована Лазаренками модель процесу ЕІЛ була першою, вона має ряд неточностей та потребує доповнень [9, 10].

1.4 Модель ЕІЛ за А. Д. Верхотуровим

Модель Лазаренків дозволяла не брати до уваги поверхневі явища та процеси, що відбуваються на електродах (аноді та катоді). Узагальнена модель процесу ЕІЛ А. Д. Верхотурова [11] враховувала багато факторів, а саме: руйнування електродів у паровій, рідкій та твердій фазах, зварювання електродів під час контакту, перекристалізацію матеріалів на катоді, в зоні дії іскри, перервний (дискретний) характер утворення легованого шару, обмеження товщини шару.

Утворення на електродах ерозійних лунок є наслідком дії струму, що призводить до нагрівання анода, та магнітного поля, яке сприяє утворенню високого тиску в тунелі розряду. В результаті цієї дії маємо появу об'ємних ділянок теплових джерел. Верхотуров поділяє ерозійну лунку на три зони: випаровування, плавлення та напруженого стану. Схематичне зображення узагальненої моделі ЕІЛ показане на рис. 1.2.



а – пробій міжелектродного проміжку; б – утворення ерозійних лунок на електродах (на аноді А та катоді К); в – момент контакту електродів;
г – утворення легованого шару (ЛШ) на катоді

Рисунок 1.2 – Схема узагальненої моделі ЕІЛ [12]

Розмір перших двох зон залежить від температур плавлення ($T_{пл}$) та кипіння ($T_{кип}$) й від коефіцієнта теплопровідності (λ): чим більші $T_{пл}$, $T_{кип}$ та λ , тим менша зона плавлення та кипіння. Полярне перенесення матеріалу анода на катод дає змогу створювати на поверхні катода змінні шари, які з'являються при взаємодії не тільки електродів між собою, а й середовища з електродами.

Модель Верхотурова також має певні недоліки. Вона не описує зв'язку між мікротвердістю отриманого шару та мікротвердістю анода, а також не пов'язує ці характеристики з жаростійкістю. Проте ця модель дала змогу керувати властивостями покриття через підбір фізико-механічних характеристик анодів.

1.5 Формування модифікованих покриттів на сталях з використанням ЕІЛ

Щоб покращити характеристики робочих поверхонь деталей, а саме: підвищити зносостійкість, корозійну стійкість та міцність, застосовують способи нанесення зміцнюючих або захисних покриттів [13]. Метод

електроіскрового легування дає змогу здобути покриття на металевих виробах різноманітними струмопровідними матеріалами.

Внаслідок ЕІЛ деталь, яка підлягає обробці, піддається зміні рельєфу, розміру, механічних, фізичних та хімічних властивостей її поверхневого шару. У змінених шарах виявляється утворення карбідів, інтерметалідів, оксидів, нітридів, дрібно-кристалічної структури тощо, в результаті чого збільшується поверхнева твердість.

Однією з важливих характеристик процесу є потужність формування поверхневого шару при ЕІЛ та його товщина. Як стверджують автори роботи [14]: «Структура та властивості покриття є відображенням умов, в яких відбувалося його формування». Отже, при аналізі методу електроіскрового легування, можна відмітити прямо пропорційну залежність товщини нанесеного шару та його шорсткості від енергії розряду. Інакше кажучи, чим менша використана енергія, тим менший шар покриття з меншою шорсткістю буде формуватися на поверхні основи. Ось чому для одержання якісних покриттів з достатньою товщиною використовують декілька, а не один, старанно підібраних анодів та середовище легування [15]. У роботі [16] описується сукупний вплив насичуючого середовища та матеріалу анода на формування зміненого шару, на його мікротвердість, зносостійкість, фазовий склад та структуру.

У свою чергу у статті [17] відмічають істотний вплив хіміко-термічної обробки (ХТО) на поверхневу твердість матеріалів.

Оскільки на тему впливу середовища легування немає достатньої кількості досліджень, не можна описати чітку картину впливу легувального середовища на характеристики модифікованого шару. Проте раніше проведені експерименти з порівняння властивостей легованих шарів сформованих у двох різних середовищах, дозволяють стверджувати, що атмосфера аргону має суттєвий вплив на товщину створеного шару, на його зносостійкість та мікротвердість.

1.6 Використання W та Cr для формування зміцненого шару методом ЕІЛ

Найбільш детально легування вольфрамом та хромом у комбінації з різними додатковими елементами описано у джерелах [18] та [19]. У ході дослідження було використано різні методики, що дало змогу припустити, що вольфрам та хром позитивно впливають на підвищення мікротвердості та зносостійкості модифікованого шару завдяки утворенню неоднорідних за концентрацією твердих розчинів з α -Fe та γ -Fe, карбідів та інтерметалідів. Через те, що хром є перехідним металом, він стимулює виникнення нерівноважно-напруженого стану з утворенням твердих розчинів, що призводить до неоднорідності мікротвердості в легованому шарі як за глибиною, так і в площині, паралельній поверхні зразка.

1.7 Електродні матеріали для ЕІЛ

Сталь марки 40X має широке використання у світі для вироблення болтів. Ця продукція чудово підходить для вживання не тільки у промисловості, а й при вирішенні побутових завдань. Болти з цієї сталі мають широкий асортимент та високий клас міцності.

До того ж сталь 40X застосовують для виробництва робочих деталей турбін, автомобілів та іншого транспорту. Також широке застосування має сортовий прокат, у тому числі фасонний, напівфабрикати, поковки, листовий прокат із цієї сталі.

Недоліком виробів з означеної сталі є їх недостатня корозійна стійкість до агресивних середовищ та до високих температур. Саме тому, що зварювальний шов є однією з основних причин утворення тріщин в матеріалі, сталь 40X потребує додаткових процедур до та після зварювання.

Пари електродів було обрано так, щоб під час ЕІЛ матеріали анодів, що належать до перехідних металів, мали змогу формувати з матеріалом основи різні типи твердих розчинів, нітридів, карбідів та інтерметалідів.

У якості першого анода для електроіскрового легування з постадійним нанесенням було використано вольфрам. Цей метал є одним з найбільш тугоплавких, тому його застосування незамінне у сферах виробництва, які пов'язані з високими температурами. Вольфрам являється основою твердих та багатьох жаростійких сплавів, також часто входить у склад інструментальних та зносостійких сталей.

Різні сполуки цього металу мають широкий спектр застосування. Наприклад, композитні матеріали та тверді сплави на основі карбіду вольфраму (WC) застосовуються для обробки металів та неметалічних конструкційних матеріалів у машинобудуванні, таких як стругання, заточення, фрезерування, видовбування та буріння свердловин у гірничій промисловості [20].

У системі $W - C$ є дві фази – W_2C і WC . Кожна має декілька структурних модифікацій, які залишаються стабільними при визначеній температурі та концентрації. Діаграма стану наведена на рис.1.3 [21].

У системі встановлено формування трьох фаз $W_2C(\beta)$, $\gamma-WC$ та WC .

Розчинність графіту у вольфрамі становить 0,7 ат.%. Діаграма (рис. 1.3) показує, що за температури 1250 °C фаза $\beta-W_2C$ поділяється на W та WC . Низькотемпературна модифікація $W_2C(\beta'')$ має гексагональну структуру з параметрами решітки $a = 0,2994 \text{ нм} + 0,2912 \text{ нм}$, $c = 0,472 \text{ нм} + 0,4823 \text{ нм}$ [22]. Високотемпературні модифікації, які виникають за температур вище 2000 °C, не доступні для метода ЕІЛ, тому в даній роботі вони не описані.

Завдяки характеристикам вольфраму та його карбідів раціональним буде його застосування при ЕІЛ для збільшення твердості, жаростійкості та зносостійкості. Експерименти, описані в джерелах [23, 24], засвідчують дане судження.

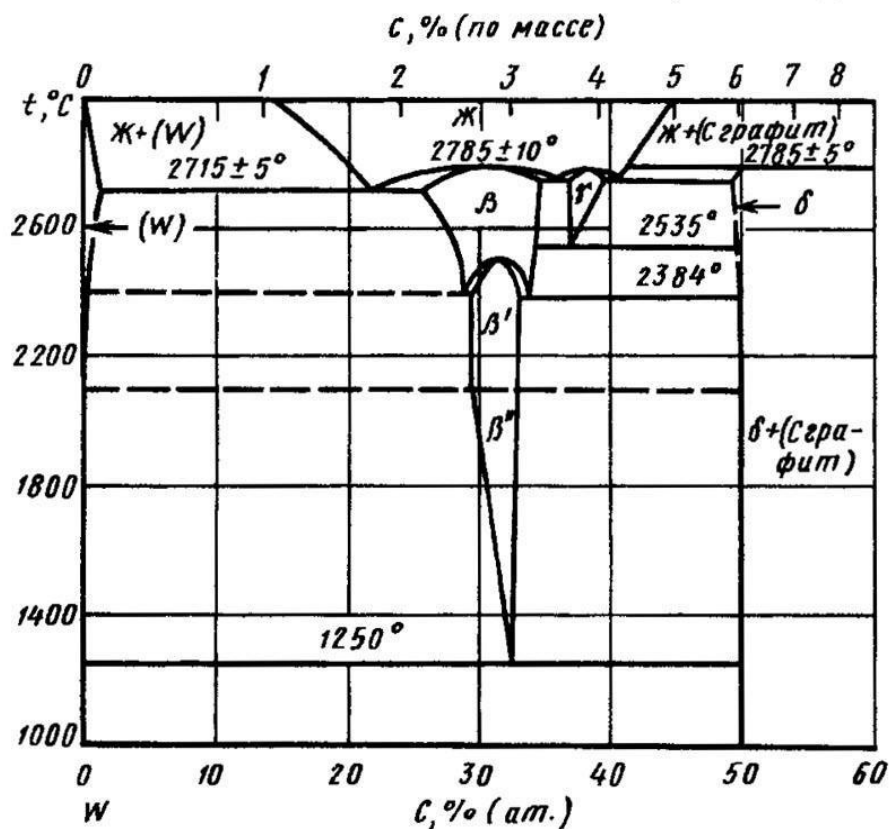


Рисунок 1.3 – Діаграма стану W - C [21]

Через те, що нанесення матеріалу вольфрамового анода здійснюється безпосередньо на сталь 40X, у складі якої є приблизно 97 % Fe, то доцільним буде навести та описати діаграму стану вольфрам-залізо (рис. 1.4) [25].

У системі існують три проміжні фази $\lambda(\text{Fe}_2\text{W})$, $\mu(\text{Fe}_7\text{W}_6)$, $\sigma(\text{FeW})$ та тверді розчини (W), (αFe), (γFe).

Зі зниженням температури розчинність W в (αFe) зменшується від 14,3 ат.% при 1548 °C до 4,6 ат.% при 1190 °C. При температурах нижче 1000 °C розчинність W в (αFe) вказана менш точно, тому що отримання рівноваги потребує багато часу [26]. W стабілізує (αFe), збільшуючи температуру перетворення (αFe) \leftrightarrow (γFe) і зменшуючи температуру перетворення (γFe) \leftrightarrow (σFe), і в результаті спричиняє появу замкнутої області (γFe). Максимальна розчинність W в (γFe) складає 1,46 ат.%.

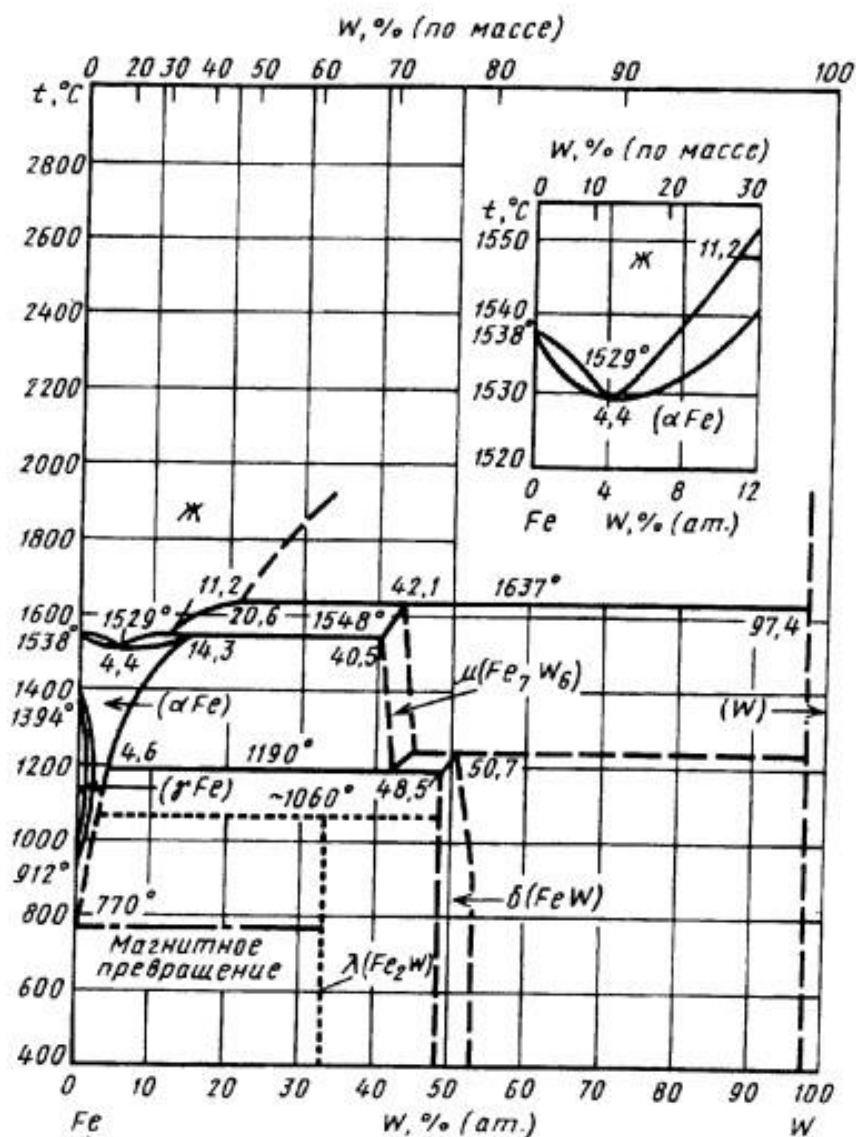


Рисунок 1.4 – Діаграма стану Fe - W [25]

Сполука Fe_2W (фаза λ) формується по перитектоїдній реакції при температурі 1060 °C з (αFe) та фази μ .

Наступним анодом для досліджень обрано хром – тугоплавкий, твердий метал (9 за шкалою Мооса) із суттєвою корозійною стійкістю, що й зробило цей метал дуже популярним у промисловості [27]. Нижче надана діаграма стану, яка показує взаємодію анодів хрому та вольфраму (рис. 1.5) [28].

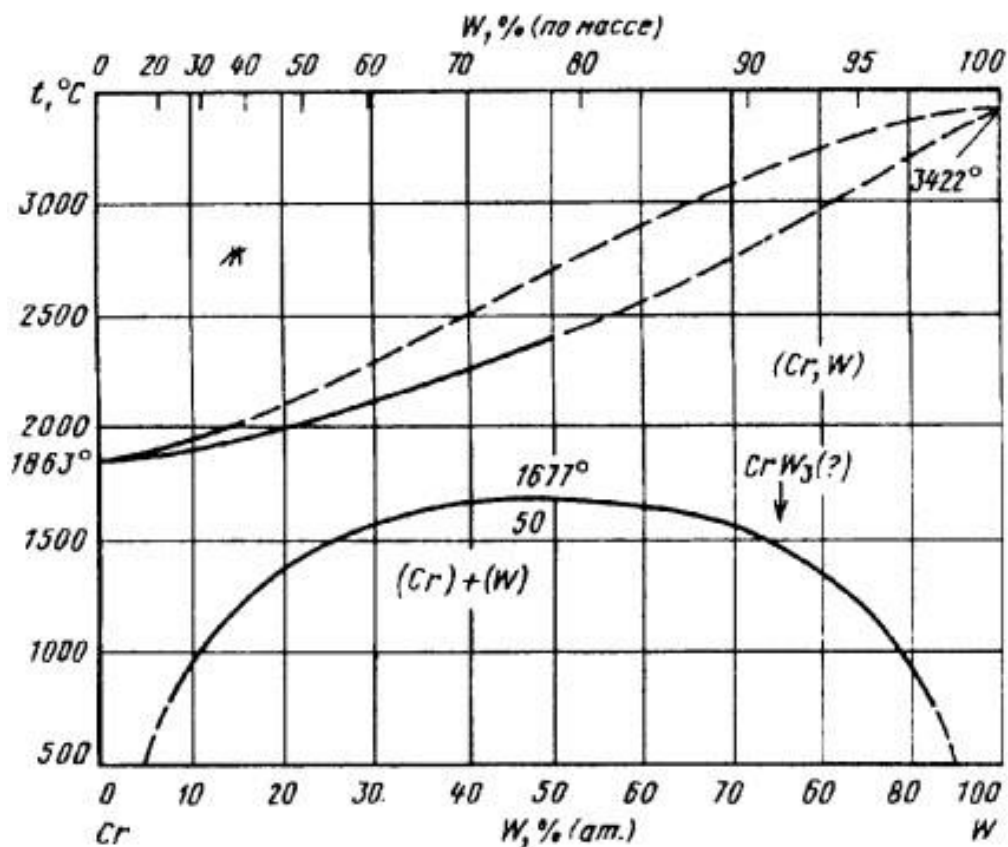


Рисунок 1.5 – Діаграма стану системи Cr - W [28]

При кристалізації Cr утворює з W неперервний ряд твердих розчинів (Cr, W). За температури нижче 1677 °C і вмісті W 50 ат.% цей ряд розділяється на два твердих розчини (Cr) та (W).

За температури 500 °C двофазна область (Cr) + (W) пролягає від 5 ат.% до 95 ат.% W і далі поступово зменшується до 1677 °C з концентрацією W від 30 ат.% до 70 ат.%.

Карбіди Cr створюють сприятливі умови зростанню зносостійкості.

Так як під час ЕІЛ є вірогідність формування карбідів, нижче приведено діаграму стану хром-графіт (рис. 1.6) [29].

Карбід Cr_7C_3 кристалізується конгруентно за температури 1789 °C та при вмісті графіту 30 ат.%. Область гомогенності Cr_7C_3 від 28,5 ат.% до 31,5 ат.% графіту (C). Найбільша розчинність C в Cr становить 1,9 ат.% або 0,45 мас.%.

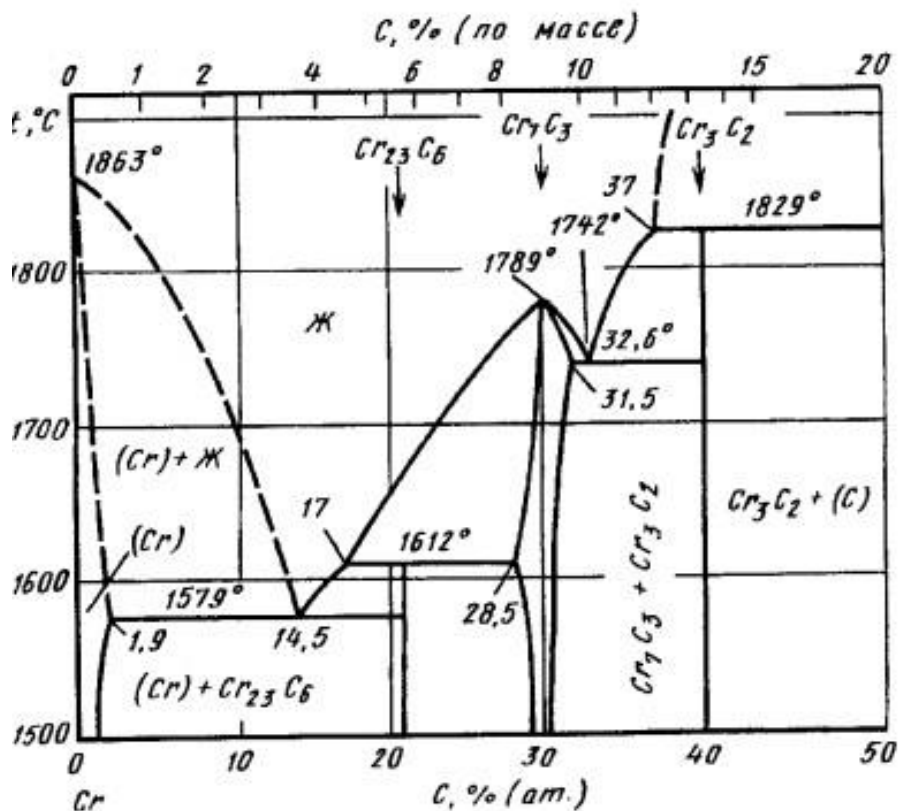


Рисунок 1.6 – Діаграма стану системи Cr - C [29]

Якщо система піддається надшвидкому охолодженню, в ній з'являється метастабільний карбід Cr_3C [30].

Хром часто застосовують в електроіскровій обробці як анод для збільшення зносостійкості, надання стійкості робочим поверхням деталей та підвищення корозійної стійкості на модифікованій поверхні. Як катод застосовують сталі зі збільшеним вмістом хрому. Необмежена розчинність хрому в залізі дає змогу створювати протяжні легovanі шари на поверхні матеріалу основи сталі [31].

Через те, що матеріал основи є сталь з високим вмістом заліза, доцільно навести діаграму стану, яка ілюструє процеси при ЕІЛ (рис. 1.7) [32].

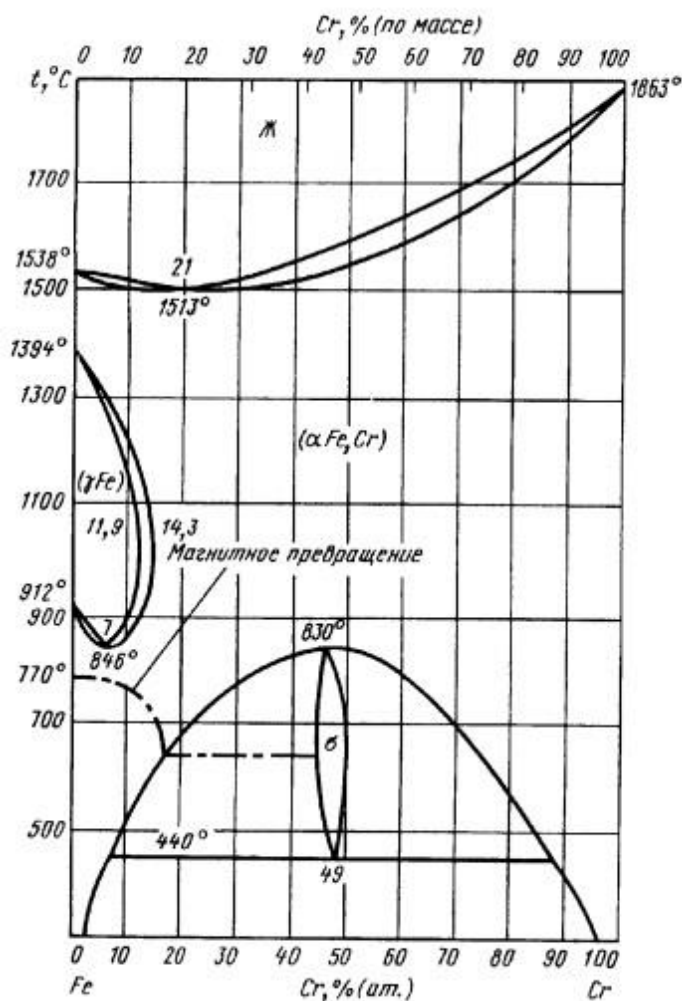


Рисунок 1.7 – Діаграма стану системи Fe - Cr [32]

Cr і Fe формують неперервні ряди твердих розчинів у рідкому та у твердому станах. На лініях ліквідуса та солідуса присутній мінімум за температури 1513 °C та при вмісті Cr приблизно 21 ат.%. У твердому стані в системі спостерігаються такі фази: проміжна фаза σ (FeCr), неперервна область твердих розчинів α -Fe і Cr (α -Fe, Cr) та обмежена область твердого розчину на основі γ -Fe. Найбільша розчинність Cr в γ Fe становить 11,9 ат.%. Межа двофазної області між γ -Fe і (α -Fe, Cr) є найменшою при вмісті Cr 7 ат.% та температурі 830 °C.

При вмісті хрому від 48 ат.% до 49 ат.% та температурі нижче 815 °C - 830 °C з (α -Fe,Cr) утворюється фаза σ , яка розпадається при температурі 440 °C - 520 °C по евтиктоїдній реакції на тверді розчині.

Оскільки під час багат шарового нанесення покриття методом ЕІЛ на матеріал основи здійснюється перемішування компонентів анода не тільки з поверхневим шаром матриці, а й з уже нанесеним змішаним шаром, то здійснюється повторна модифікація складу та характеристик сформованого покриття.

Цей факт змушує звернути увагу на те, що очікуваний результат може не збігатися за характеристиками та складом з фактичними даними [12]. Тому детальний аналіз діаграм стану дає змогу наблизити очікування до реальних результатів.

Завдяки формуванню неперервного ряду твердих розчинів у системі W - Cr можна очікувати певного росту мікротвердості.

1.8 Висновки до розділу 1

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок про ефективність застосування методу електроіскрового легування (ЕІЛ), що підтверджує актуальність обраного методу обробки поверхні, але свідчить про недостатню кількість інформації, присвяченій впливу на характеристики, хімічний склад та структуру сталі 40X після послідовного нанесення шару вольфраму та хрому методом ЕІЛ. Через це тема даної роботи є актуальною.

Головною ідеєю проведених дослідів є те, що легування сталі 40X вольфрамом може давати можливість утворення дисперсних карбідів вольфраму, які у свою чергу будуть підвищувати твердість та зносостійкість, що підтверджено певними дослідженнями [21, 33, 34].

Через необмежену розчинність хрому в залізі, легування хромом дає змогу одержати твердий розчин у залізі. Крім того, при взаємодії з вуглецем хром може сформувати дисперсні карбіди, що мають відмінні від карбідів вольфраму властивості (твердість, розмір, крихкість частинок).

Твердий розчин хрому в залізі має змогу бути відносно м'якою та пластичною матрицею, де будуть утворюватися дисперсні частинки карбідів хрому та вольфраму згідно принципу Шарпі [35].

Така обробка дає змогу сформувати на поверхні сталі методом ЕІЛ модифікований шар, характеристики якого відповідають вимогам до деталей підвищеної зносостійкості.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали досліджень

Для виробництва деталей підвищеної міцності, таких як осі, вали, вал-шестерні, плунжери, штоки, колінчаті й кулачкові вали, кільця, шпинделі, оправки, рейки, губчасті вінці, болти, півосі, втулки та інші, використовують конструкційну сталь, леговану хромом [36]. Для збільшення міцності робочі поверхні таких деталей модифікують.

В якості катоду було обрано сталь 40Х, яка завдяки своїм фізико-хімічним властивостям може бути використана як:

- корозійностійкий матеріал з високою твердістю;
- деталі машин, які у процесі експлуатації часто зазнають ударні навантаження [37];
- сортовий прокат, у тому числі фасонний, напівфабрикати, поковки, листовий прокат;
- заготовки дисків парових турбін з робочою температурою до 350 °С [38].

Хімічний склад сталі 40Х наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад у відсотках [36]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8-1,1	до 0,3

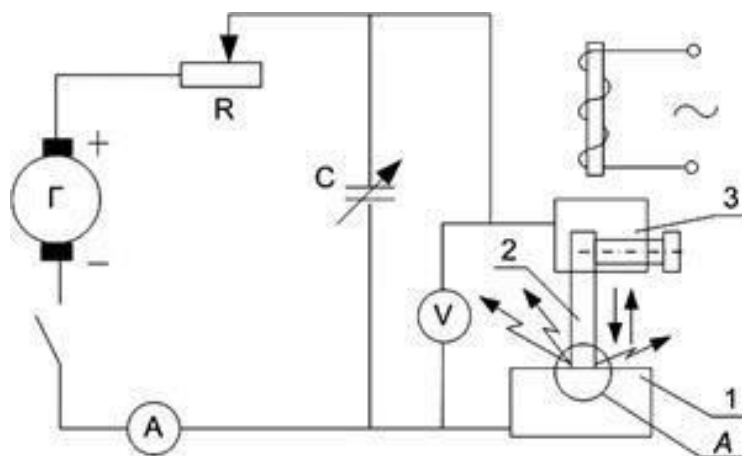
Дослідження в даній роботі має на меті утворення міцного, зносостійкого покриття з сильною адгезією до матриці основи з можливістю застосування на робочих поверхнях деталей машин. Наприклад, для промислових виробництв турбін, автомобілів тощо.

Для досягнення поставленої мети було досліджено 2 зразка з послідовним нанесенням вольфраму та хрому методом електроіскрового легування на матеріал основи сталь 40Х.

Одним з матеріалів, що використовувався в якості аноду при послідовному нанесенні, було обрано вольфрам – тугоплавкий матеріал з надзвичайно високою термічною стабільністю. Іншим матеріалом було обрано хром – тугоплавкий метал, що має високу корозійну стійкість.

2.2 Електроіскрове легування

Для отримання покриттів зі зміненими властивостями методом електроіскрового легування на матеріалі основи була використана установка «ЭЛИТРОН-26А». Схема даної установки наведена на рис. 2.1.



1 – деталь (катод); 2 – електрод (анод); 3 – анодний тримач

Рисунок 2.1 – Принципова схема електроіскрової установки [39]

Основним принципом дії установки є генерування електроіскрових розрядів між двома електродами, катодом – оброблюваною деталлю, та анодом – матеріалом, яким оброблюється катод.

У даній роботі процес ЕІЛ проводився лише на повітрі.

Обробка була проведена в одному режимі, при силі струму 2 А та напрузі 60 В - 70 В. Кожна з поверхонь оброблювалась 3 хвилини кожним анодом.

2.3 Методи, які були використані для дослідження

Щоб найбільш якісно проаналізувати результати експериментів, одного методу було недостатньо. Тому в даній роботі було використано комплекс методів, що дало змогу всебічно розглянути отримані експериментальні дані та зробити висновки стосовно можливої сфери використання зазначених схем обробки.

Цей комплекс містить наступні методи:

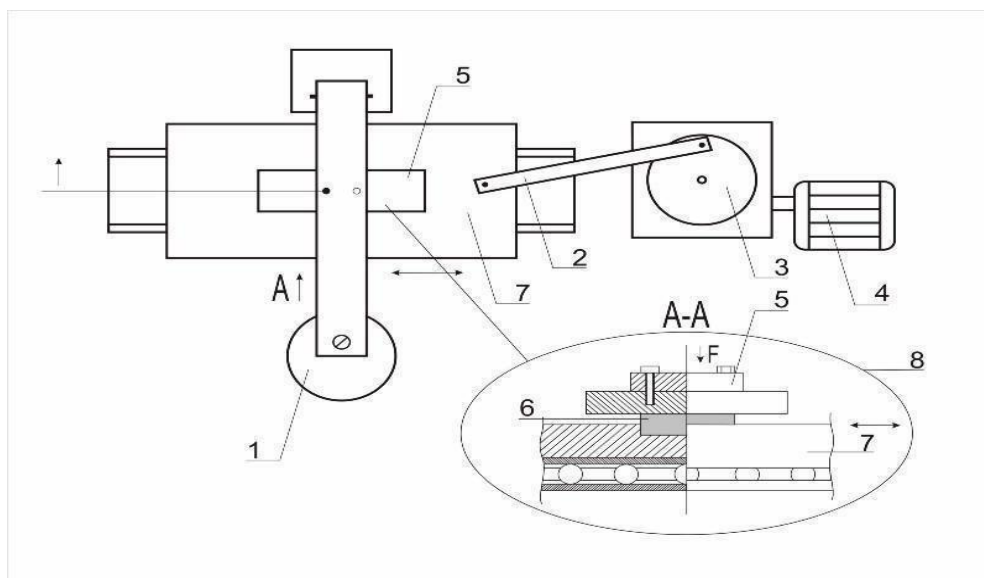
- дослідження на зносостійкість;
- гравіметричний аналіз;
- мікродюрOMETричний аналіз;
- рентгенофазовий аналіз;
- мікроструктурний аналіз.

2.3.1 Дослідження на зносостійкість

Для проведення випробувань на зносостійкість була використана оригінальна машина тертя для визначення зносостійкості легованих шарів. Вона застосовує принцип зворотно-поступального руху в умовах контактного зношування при сухому терті-ковзанні за схемою «площина по площині».

Загальна схема машини тертя наведена на рис. 2.2. Як матеріал контртіла була використана загартована інструментальна сталь Р6М5.

Установка працює за таким принципом: до обертальної частини редуктора прикріплено шатун, на який передається обертання від електродвигуна постійного струму. За допомогою цього шатуна по напрямним здійснює зворотно-поступальний рух рухома платформа, на якій розташований досліджуваний зразок. Під час дії навантаження (гиря) 4 кг зразок контактує із закріпленим на важелі контртілом.



- 1 – навантаження (гиря); 2 – шатун; 3 – колінчата передача;
 4 – електродвигун; 5 – контртіло; 6 – зразок; 7 – станина;
 8 – загальна схема тертя

Рисунок 2.2 – Загальна схема машини тертя [40]

Для оцінювання зносостійкості був застосований ваговий метод: досліджуваний зразок зважували до і після випробування через кожні 10 хвилин. Для кожного зразка загальний час зношування складав 400 хвилин. Використовуючи аналітичні терези з точністю до 0,0005 г, вимірювали втрату маси зразка, за якою оцінювали величину зносостійкості. Інтенсивність зношування (г/см^2) знаходили, користуючись формулою:

$$I = \frac{\sum \Delta m}{S}, \quad (2.1)$$

де Δm – втрата маси, кг;

S – площа поверхні тертя зразка, см^2 .

За розрахунками за формулою (2.1) для кожного із зразків було побудовано криві зношування в залежності від часу.

2.3.2 Гравіметричний аналіз

Аналіз зразків гравіметричним методом полягає у відстеженні змін маси електродів на кожній стадії процесу з визначеним кроком. Вимірювання маси відбувається також перед початком електроіскрової обробки. У даній роботі зважування проводилось кожну хвилину. Для спостереження змін маси катода або анода використовувались лабораторні електронні ваги AXIS AD50, з заявленою точністю $\pm 0,0005$ г.

Попередня оцінка процесу обробки та формування модифікованого покриття відбувається за ерозією анода Δm^a та приростом маси катода Δm^k , що виявляється у зміні маси обох електродів.

Зміна маси електродів визначається за формулою:

$$\Delta m^3 = m(t_n) - m(t_0), \quad (2.2)$$

де Δm^3 – зміна маси електрода (анода або катода);

t_0 – час початку обробки;

t_n – час n-го вимірювання маси зразка.

Для розрахунку приросту маси катода використовують формулу:

$$\Delta m_k^{\Pi}(t) = m_k(t_n) - m_k(t_{n-1}), \quad (2.3)$$

де Δm_k^{Π} – приріст маси катода;

t_n – час n-го вимірювання маси зразка;

t_{n-1} – час попереднього вимірювання.

Ерозію анода (Δm_a^e) розраховують за формулою, аналогічною формулі (2.2), тільки обираються дані, що стосуються анода.

Тож коефіцієнт масоперенесення визначається за формулою:

$$K = \frac{\Delta m_k^{\Pi}}{\Delta m_a^e}, \quad (2.4)$$

де K – коефіцієнт масоперенесення (%).

2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз

Мікротвердість обробленої поверхні замірювалась на протравлених зразках за допомогою приладу ПМТ-3М (рис. 2.3).

Принцип дії зазначеного приладу заснований на методі визначення мікротвердості за Віккерсом [41].



Рисунок 2.3 – Мікротвердомір ПМТ-3М [41]

Мікротвердість зразка визначалася шляхом вдавнення стандартної алмазної пірамідки з двограним кутом при вершині 136° при навантаженні 20 г та 50 г протягом інтервалу від 7 секунд до 10 секунд.

Мікротвердість у ГПа вираховували за величиною діагоналі, користуючись формулою:

$$H_\mu = \frac{18,2 \times P}{(0,31 \times z)^2} [\text{ГПа}] = \frac{1,854 \times P}{d^2} \left[\frac{\text{кг} \times \text{с}}{\text{мм}^2} \right], \quad (2.5)$$

$$H_\mu = \frac{1,854 \times P}{d_{\text{cp}}^2}, \quad (2.6)$$

де H_μ – значення мікротвердості;

P – навантаження на індентор;

$d_{\text{ср}}$ – середнє значення діагоналей d_1 і d_2 , яке розраховується за формулою:

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (d_{i1} + d_{i2})}{2 \times n}, \quad (2.7)$$

де d_{i1}, d_{i2} – відповідно довжини діагоналей чотирикутного відбитка, мкм.

2.3.4 Рентгенофазовий аналіз

Для рентгенофазового аналізу модифікованої поверхні застовувався дифрактометр Ultima IV (Rigaku).

Задачі, які має вирішувати дифрактометр Rigaku Ultima IV:

- кількісний аналіз;
- ступінь кристалізації;
- фазовий аналіз різних матеріалів;
- залишкові напруги;
- кристалічні структури;
- переважні орієнтації;
- розмір кристалітів;
- досконалість кристалічної структури;
- функція радіального розподілу;
- розподіл розмірів наночастинок і пор;
- орієнтація та структура тонких плівок;
- одночасний рентгеноструктурний та калориметричний аналіз;
- багатошарові структури (товщина, щільність, шорсткість).

Із представлених на ринку дифрактометрів тільки Ultima IV має повністю автоматичне користування всієї системи. Зйомки проводились на мідному монохроматизованому випроміненні при напрузі 30 кВ та струмі 30 мА.

Однією з важливих переваг приладу є можливість здійснення сканування у двох взаємно перпендикулярних площинах без необхідності перебудови

системи. Застосування in-plane геометрії дає змогу проводити аналіз плівок товщиною до 1 нм. Ця геометрія дозволяє встановлювати параметри решітки у площині зразка, а також з'ясовувати орієнтаційні відношення в системі плівка/підложка, що неможливо зробити при використанні класичної геометрії.

Прилад також має вбудовані бази даних, що дозволяє автоматично аналізувати дифрактограми в електронному вигляді.

2.3.5 Мікроструктурний аналіз

Для проведення експериментів з визначення мікроструктури за допомогою оптичної мікроскопії використовувалися зразки металографічних поперечних шліфів. Щоб якісно підготувати поперечні шліфи, потрібно зафіксувати оброблений зразок. Для цього була застосована струбцина з мідною пластиною, яка прилягала до утвореного шару. Шліфування проводилося з використанням абразивного паперу різної шорсткості з поступовим зменшенням абразивних часток. Дзеркальна поверхня формувалася за допомогою полірувальної пасту ДОИ (оксид хрому III) з наступним переходом на шліфування водою.

Отримана поверхня шліфу протравлювалася 20 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті.

Для наступного металографічного аналізу було проведено фотографування шліфів мікроструктури на оптичному мікроскопі МЕТАМ РВ-21 (рис. 2.4) при збільшенні від 100 разів до 400 разів.



Рисунок 2.4 – Металографічний мікроскоп МЕТАМ з верхнім розташуванням предметного столику [42]

Для отримання фото поверхні було використано фото-насадку та програму, яка передає зображення на комп'ютер.

2.4 Висновки до розділу 2

Для вирішення задач переддипломної практики було проведено електроіскрове легування сплаву сталь 40Х анодами W та Cr без захисного середовища на повітрі за схемами W - Cr та Cr - W.

Було аргументовано вибір вихідних матеріалів (легувальних електродів) для дослідження.

Було відібрано та представлено використану методику дослідження, що дає змогу одержати дані для аналізу результатів ЕІЛ.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

У даній роботі було досліджено вплив матеріалів анодів (W, Cr) при різних послідовності електроіскрового легування на структуру та мікротвердість поверхневих шарів сталі 40X.

Легування зразків сталі 40X відбувалось у два етапи на повітрі при напрузі 60 В та струмі 1,5 А. Легування кожним анодом проводилося протягом 3 хвилин і здійснювалося за схемами W - Cr, Cr - W.

3.1 Дослідження зразків після ЕІЛ за схемою W - Cr

У результаті мікроструктурного аналізу сталі 40X після двостадійного електроіскрового легування на повітрі вольфрамовим та хромовим анодами було визначено, що легований шар після ЕІЛ зразка за схемою W - Cr має товщину від 10 мкм до 24 мкм (рис. 3.1).

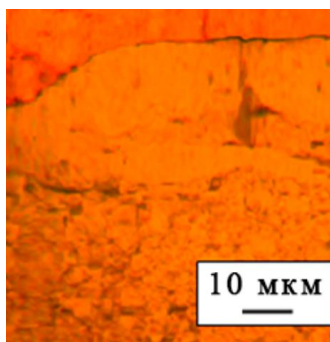


Рисунок 3.1 – Мікроструктура поверхневого шару сталі 40X після легування за схемою W - Cr

Було проведено гравіметричний аналіз зразка сталі 40X, що дозволило побудувати кінетичні криві масоперенесення, а саме сумарного приросту маси катоду $\sum \Delta m_k$ та сумарної ерозії анодів $\sum \Delta m_a$. Результати представлені на рис. 3.2.

Після першого етапу легування вольфрамом можна спостерігати додатній приріст маси катода. На п'ятій хвилині, коли крива $\sum \Delta m_k$ перетинає вісь

абсцис, виникає критичний поріг руйнування. Наступний етап легування хромом викликав ерозію катода та майже не вплинув на приріст його маси.

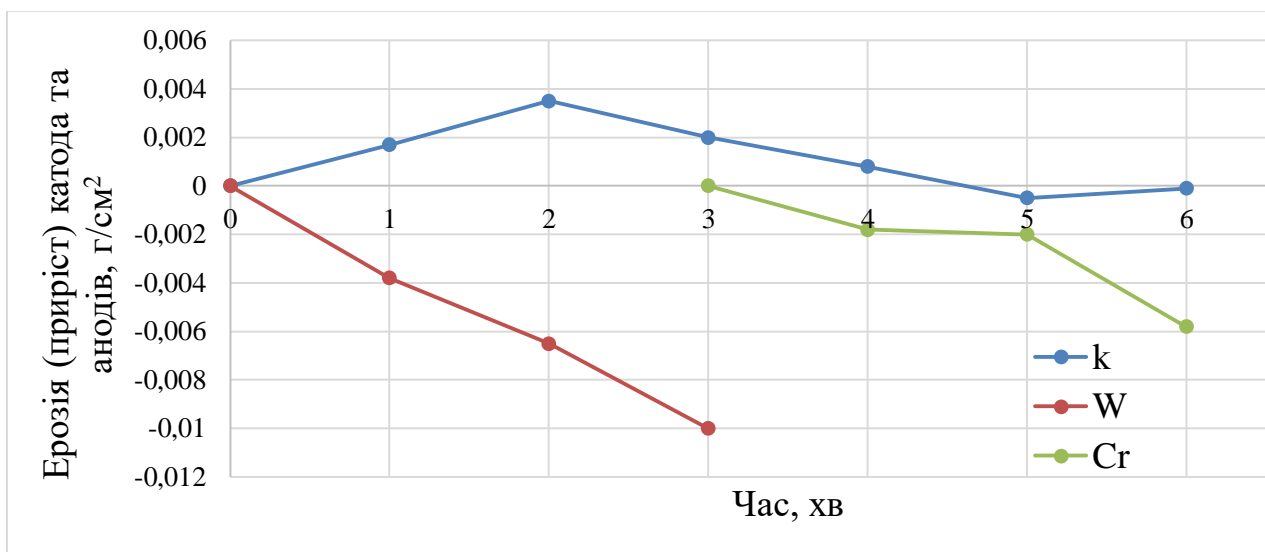


Рисунок 3.2 – Кінетика масоперенесення під час ЕІЛ за схемою W - Cr

Для зразка сталі 40X після ЕІЛ за схемою W - Cr був проведений рентгенофазовий аналіз, результати якого представлені в табл. 3.1. Дифрактограма представлена на рис. 3.3.

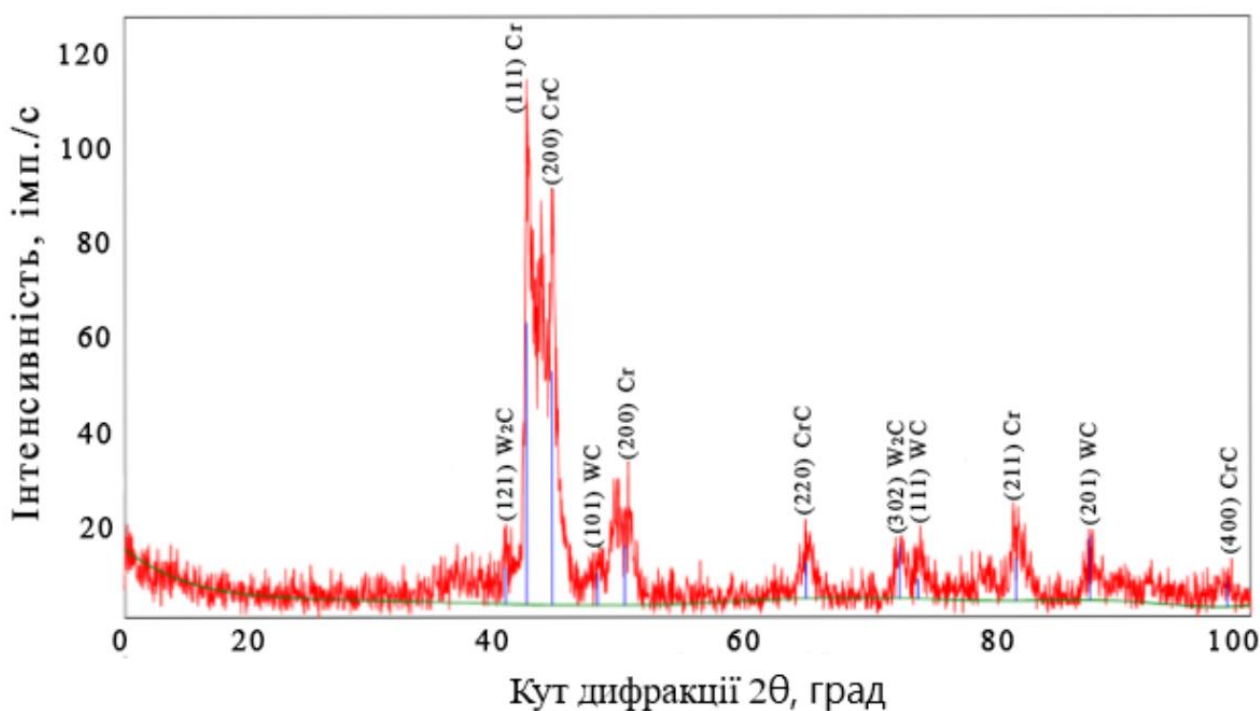


Рисунок 3.3 – Дифрактограма покриття W - Cr після ЕІЛ сталі 40X

Таблиця 3.1 – Фазовий склад покриття W - Cr після ЕІЛ сталі 40X

№	Кут дифракції 2θ , град	Міжплощинна відстань d , Å	Фаза (HKL)
1	40	2,2286	W ₂ C (121)
2	42	2,1442	Cr (111)
3	44	2,0483	CrC (200)
4	48	1,9017	WC (101)
5	50	1,8246	Cr (200)
6	64	1,4444	CrC (220)
7	72	1,3115	W ₂ C (302)
8	73	1,2890	WC (111)
9	81	1,1835	Cr (211)
10	87	1,1176	WC (201)
11	98	1,0197	CrC (400)

Дані рентгеноструктурного аналізу показали наявність таких фаз: Cr, W₂C, WC, CrC та дозволили розрахувати періоди їх кристалічних ґраток, розміри ОКР та мікрвикривлення (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Параметри структури покриття W - Cr після ЕІЛ сталі 40X

Фаза	Період ґратки, Å			Розміри ОКР, Å	Мікрвикривлення $\frac{\Delta d}{d}$, %
	a	b	c		
Cr	3,7272	–	–	242	1,58
W ₂ C	4,83	6,23	4,54	21	0,53
WC	2,845	–	2,916	28	1,32
CrC	4,076	–	4,076	21	0,25

МікродюрOMETричний аналіз зразків легованих у послідовності W - Cr дав змогу встановити значне підвищення мікротвердості легованого шару до 10,5 ГПа (рис. 3.4).

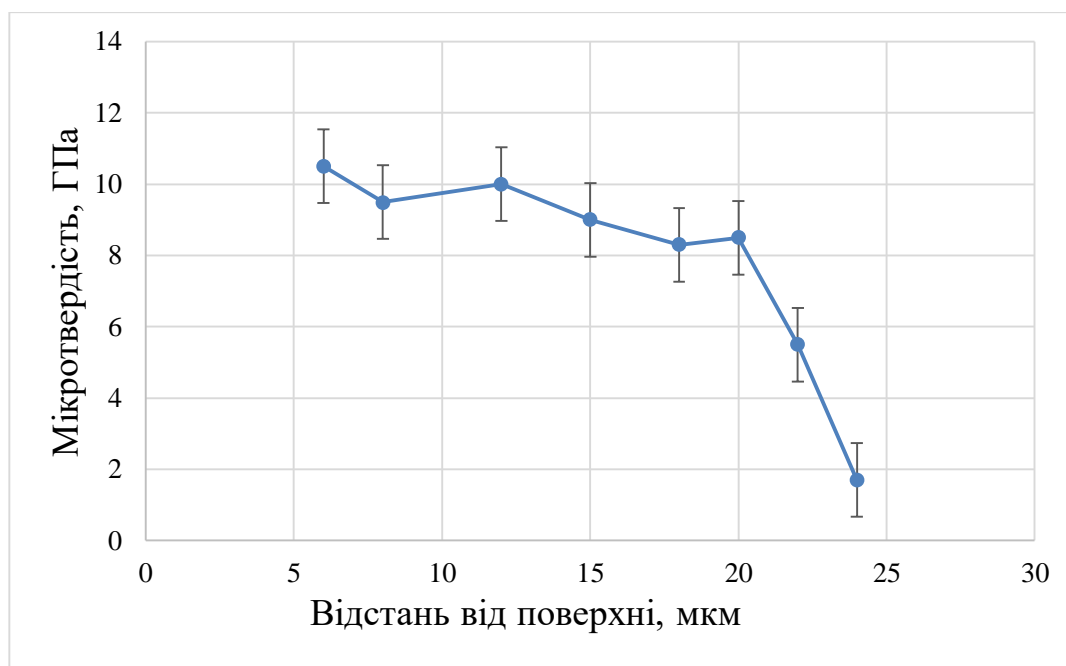


Рисунок 3.4 – Мікротвердість у поверхневій зоні сталі 40X після ЕІЛ за схемою W - Cr

3.2 Дослідження зразків після ЕІЛ за схемою Cr - W

Після ЕІЛ за даною схемою утворюється рівномірний шар, який має товщину від 10 мкм до 32 мкм (рис. 3.5).

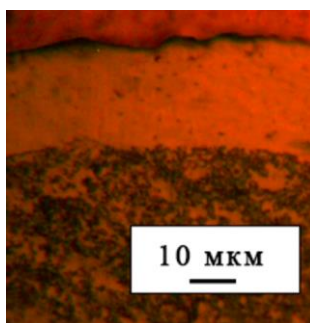


Рисунок 3.5 – Мікроструктура поверхневого шару сталі 40X після ЕІЛ за схемою Cr - W

Було проведено гравіметричний аналіз зразка сталі 40X, що дозволило побудувати кінетичні криві масопереносу, а саме сумарного приросту маси катоду $\sum \Delta m_k$ та сумарної ерозії анодів $\sum \Delta m_a$. Результати представлені на рис. 3.6.

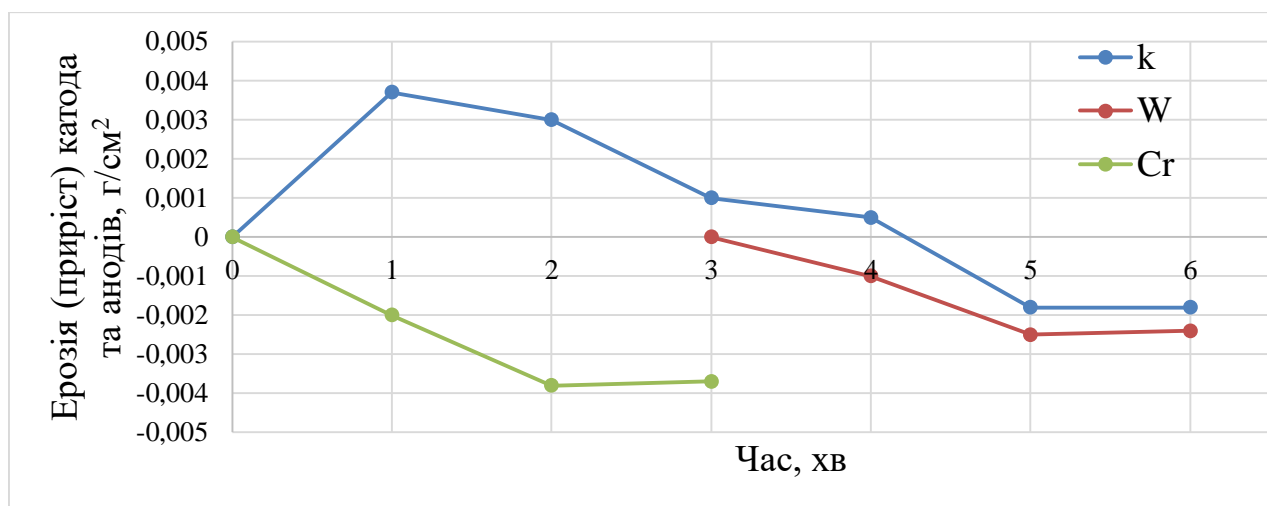


Рисунок 3.6 – Кінетика масоперенесення під час ЕІЛ за схемою Cr - W

Під час першого етапу легування, а саме – нанесення хрому, можна спостерігати додатній приріст маси катода. Критичний поріг зменшення поверхневого шару виникає на п'ятій хвилині ЕІЛ, що співпадає з другою хвилиною нанесення вольфраму.

Для зразка сталі 40X після ЕІЛ за схемою Cr - W був проведений рентгенофазовий аналіз, результати якого представлені в табл. 3.3. Дифрактограма представлена на рис. 3.7.

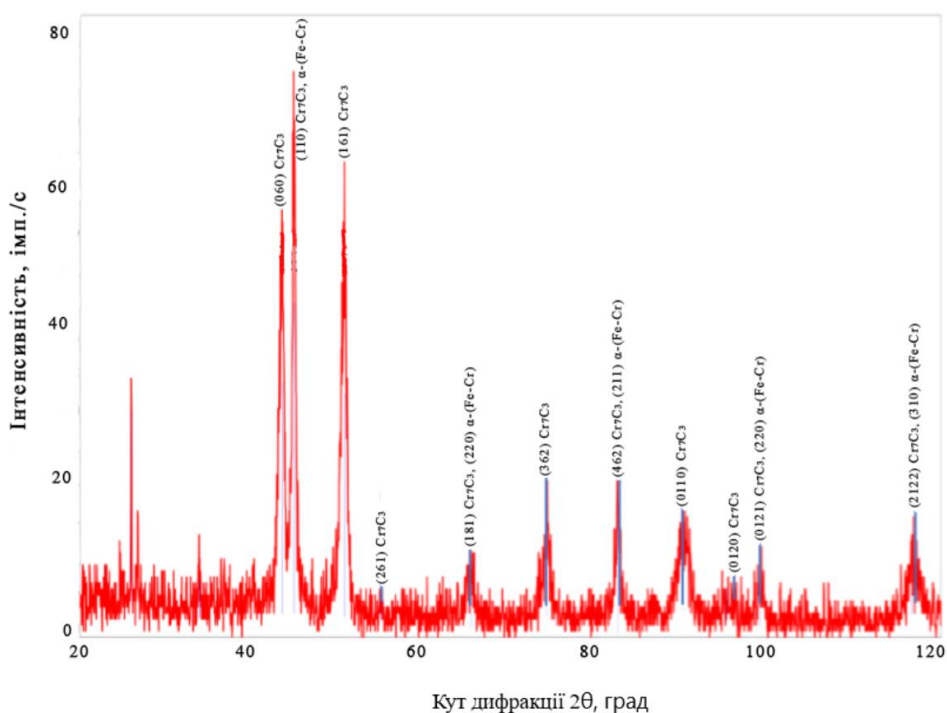


Рисунок 3.7 – Дифрактограма покриття Cr - W після ЕІЛ сталі 40X

Таблиця 3.3 – Фазовий склад покриття Cr - W після ЕІЛ сталі 40Х

№	Кут дифракції 2 θ , град	Міжплощинна відстань d, Å	Фаза (HKL)
1	43,45(4)	2,0811	Cr ₇ C ₃ (060)
2	44,84(3)	2,0196	α -(Fe-Cr) (110), Cr ₇ C ₃ (110)
3	50,70(5)	1,7990	Cr ₇ C ₃ (161)
4	54,89	1,671	Cr ₇ C ₃ (261)
5	65,42(18)	1,425	α -(Fe-Cr) (220), Cr ₇ C ₃ (181)
6	74,18(14)	1,277	Cr ₇ C ₃ (362)
7	82,43(2)	1,1690	α -(Fe-Cr) (211), Cr ₇ C ₃ (462)
8	90,01(17)	1,0893	Cr ₇ C ₃ (0110)
9	95,05	1,0443	Cr ₇ C ₃ (0120)
10	98,95	1,0133	α -(Fe-Cr) (220), Cr ₇ C ₃ (0121)
11	116,6(3)	0,9054	α -(Fe-Cr) (310), Cr ₇ C ₃ (2122)

Дані рентгеноструктурного аналізу показали наявність таких фаз твердого розчину: α -(Fe-Cr) та Cr₇C₃ та дозволили розрахувати періоди їх кристалічних ґраток та мікровикривлення (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметри структури покриття Cr - W після ЕІЛ сталі 40Х

Фаза	Період ґратки, Å			Розміри ОКР, Å	Мікровикривлення $\frac{\Delta d}{d}$, %
α -(Fe-Cr)	2,866			123	0
Cr ₇ C ₃	a	b	c	113	0
	7,29	12,5	4,451		

Під час ЕІЛ в послідовності Cr - W мікротвердість легованого шару збільшилась до 6,3 ГПа (рис. 3.8). У межах модифікованого шару мікротвердість змінює значення від 6,3 ГПа до 4,5 ГПа, що демонструє можливий неоднорідний фазовий склад цієї зони. У порівнянні з попередніми результатами ЕІЛ обробка за схемою Cr - W спричиняє менш значне

підвищення мікротвердості (6,3 ГПа у порівнянні з мікротвердістю, отриманою при легуванні за схемою W - Cr, до 10,5 ГПа).

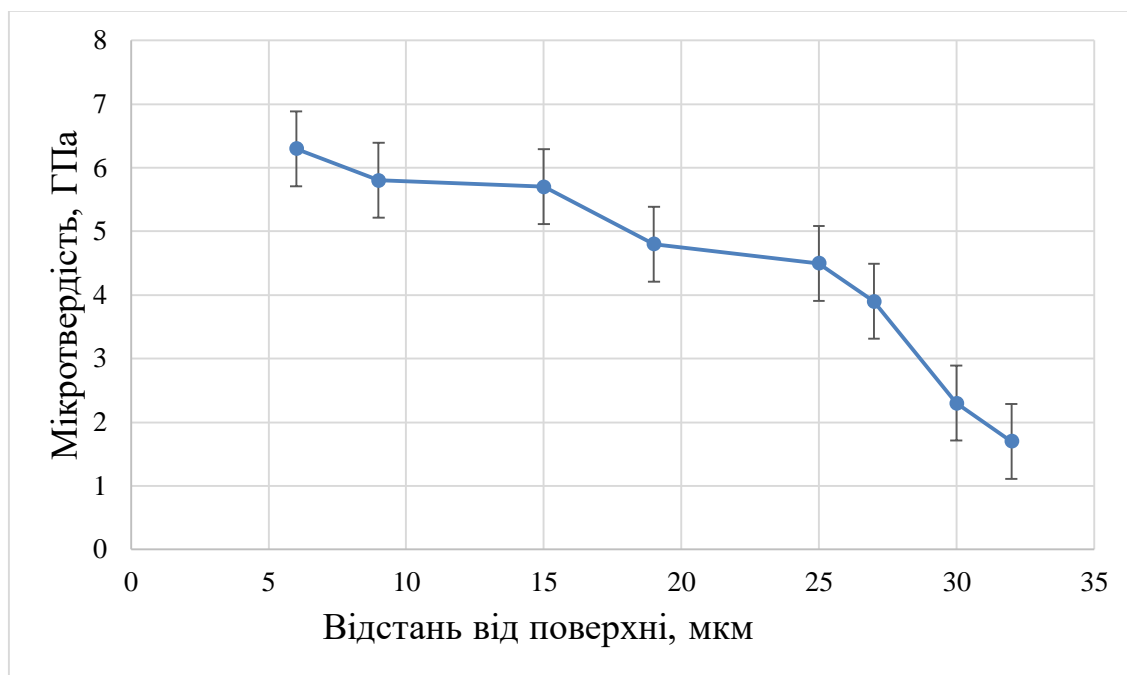


Рисунок 3.8 – Мікротвердість у поверхневій зоні сталі 40X після ЕІЛ за схемою Cr - W

Порівнюючи з шаром, отриманим за схемою легування W - Cr (до 24 мкм), можна стверджувати, що обробка з послідовністю Cr - W приводить до формування більшої товщини шару (до 32 мкм).

3.3 Зносостійкість поверхонь сталі 40X після ЕІЛ за схемами W - Cr та Cr - W

Випробування на зносостійкість було проведено за схемою «площина по площині» в умовах сухого тертя протягом 120 хвилин. Отримані дані дозволили побудувати залежність інтенсивності зношування від часу випробування для зразків W - Cr та Cr - W, яка зображена на рис. 3.9.

При порівнянні інтенсивності зносу легованих та вихідного зразків було зроблено висновок, що у зразка, легованого за схемою W - Cr, інтенсивність зносу у 7,3 рази менша, ніж нелегованого. Що стосується зразка, легованого за

схемою Cr - W, то його інтенсивність зносу у 2,75 рази менша, ніж нелегованого зразка. При цьому інтенсивність зносу зразка, легованого за схемою W - Cr, у 2,6 рази менша, ніж у зразка, легованого за схемою Cr - W.

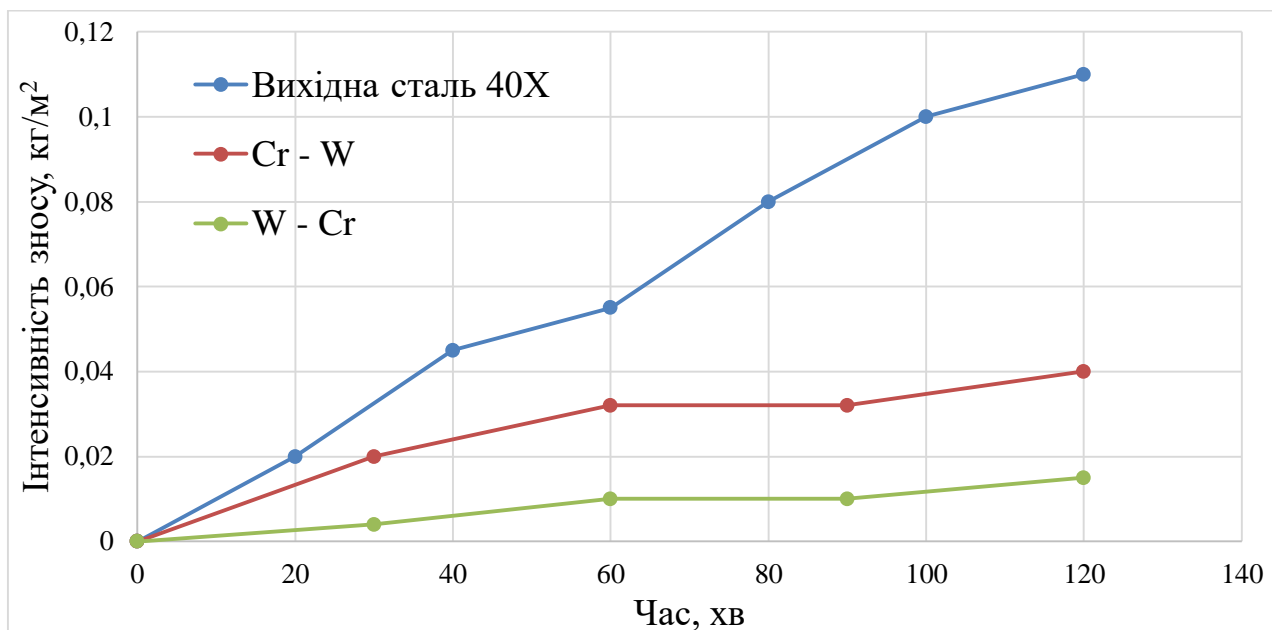


Рисунок 3.9 – Залежність інтенсивності зносу від часу для зразків сталі 40X до та після ЕІЛ

Таке зниження тертя можна пояснити наявністю фаз карбідів вольфраму в легovanому шарі та утворенням структури, що відповідає принципу Шарпі [35].

3.4 Порівняльна характеристика шарів, отриманих при ЕІЛ анодами W та Cr

За результатами досліджень структури та характеристик поверхневих шарів сталі 40X після ЕІЛ анодами W та Cr за схемами W - Cr та Cr - W було встановлено, що модифікований шар, створений за схемою Cr - W, має найбільшу товщину (до 32 мкм).

Діаграма для наочного зображення залежності товщини легovanого шару від схеми легування представлена на рис. 3.10.

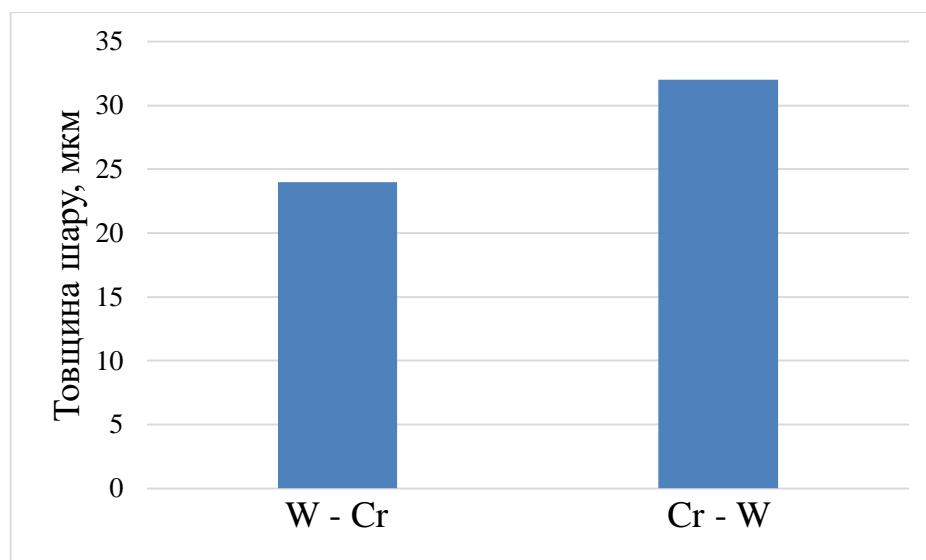


Рисунок 3.10 – Залежність товщини легованого шару від схеми легування

Ретгенофазовий аналіз дозволив встановити розмір зерен у досліджуваних зразках, що леговані за схемами W - Cr та Cr - W, та показав, що карбіди найбільшого розміру присутні у шарі, легованому за схемою W - Cr, і складає 242,8 Å.

Досліди показали, що при легуванні з використанням схеми W - Cr формується шар, який має найбільшу мікротвердість (до 10,5 ГПа). При легуванні за схемою Cr - W мікротвердість була найменшою (6,3 ГПа). Графічне зображення представлено на рис. 3.11.

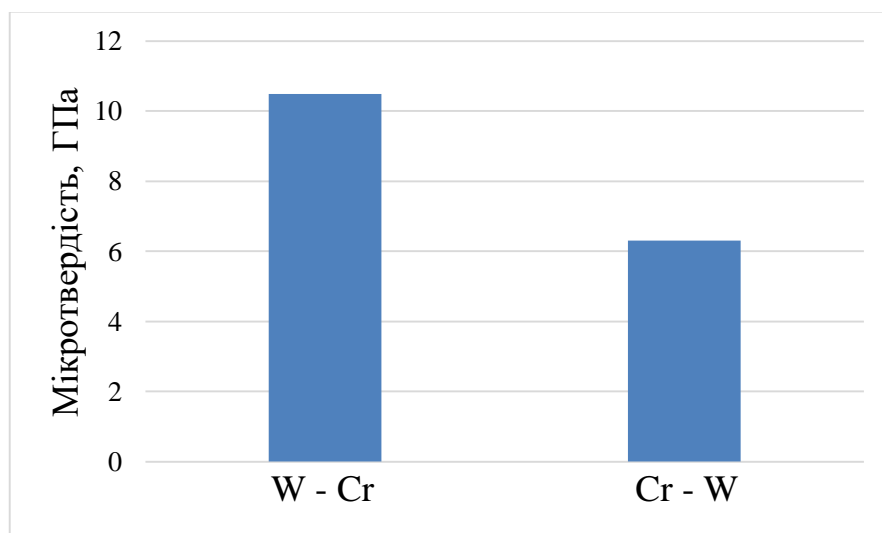


Рисунок 3.11 – Залежність мікротвердості легованого шару від схеми легування

Максимальну мікротвердість було виявлено у зразках сталі 40Х при послідовності ЕІІ, коли першим легувальним елементом було застосовано W. Те, що вольфрам необмежено розчиняється у хромі й обмежено у Fe, дозволяє формуватися насиченим твердим розчинам зі збільшеними періодами ґратки 2,8694 Å. Це у свою чергу спричинює зростання розчинення вуглецю у твердому розчині при подальшій стадії легування зразка.

Нижче приведена діаграма (рис. 3.12) показує збільшення зносостійкості для застосованих схем легування в порівнянні з вихідним матеріалом зразка сталі 40Х. Результати аналізу показали зростання зносостійкості в усіх оброблених зразках. Найбільше зростання зносостійкості наявне у зразку, легованого за схемою W - Cr, – у 7,3 рази у порівнянні з необробленим зразком. Легування за схемою Cr - W дало менший ріст зносостійкості – лише у 2,75 рази. Це можна пояснити тим, що оскільки вольфрам має більшу карбідоутворюючу здатність у порівнянні з Cr, то в разі нанесення його першим (за схемою W - Cr) було утворено більшу кількість карбідів в обробленому шарі.

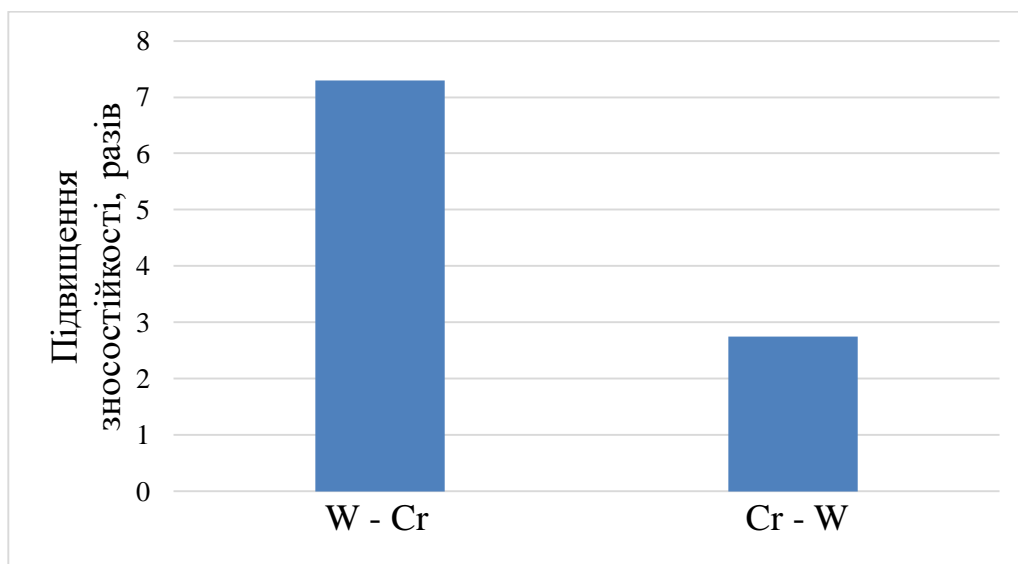


Рисунок 3.12 – Порівняльна діаграма підвищення зносостійкості відповідно до схеми легування

3.5 Висновки до розділу 3

При аналізуванні експериментальних даних, отриманих при ЕІЛ сталі 40Х, були зроблені наступні висновки.

З'ясовано, що зміна послідовності ЕІЛ сталі 40Х анодами W та Cr чине вплив на мікротвердість, структуру, фазовий склад, зносостійкість легованого шару.

Встановлено, що при ЕІЛ сталі в послідовності W - Cr модифікований шар отримує найбільшу мікротвердість (10,5 ГПа), а при послідовності Cr - W – меншу (6,3 ГПа).

З'ясовано, що більші значення мікротвердості здобуваються в модифікованих шарах, які утворювалися при першому легуванні W, що могло супроводжуватись формуванням пересиченого розчину W в залізі, зростанні періоду ґратки заліза (до 2,869 Å), збільшенні концентрації розчиненого вуглецю, формуванні дисперсних карбідів W та Cr.

Встановлено, що максимальну товщину (до 32 мкм) має модифікований шар, що сформований за схемою Cr - W. В іншому випадку товщина легованого шару не перевищує 24 мкм.

З'ясовано, що інтенсивність зносу зразка, легованого за схемою W - Cr, у 2,6 рази менша, ніж у зразка, легованого за схемою Cr - W.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність НДР

Новітні досягнення у промисловості ставлять високі вимоги до надійності та довговічності деталей машин та механізмів, які працюють у складних умовах. Тому актуальним напрямком є пошук нових ефективних способів зміцнення поверхневих шарів і створення зносостійких покриттів.

Одним з найбільш перспективних та ефективних методів поверхневої обробки є електроіскрове легування, яке забезпечує формування зміцненого покриття при використанні електродів з будь-яких електропровідних матеріалів.

Метою даної роботи є дослідження будови та властивостей поверхневих шарів сталі 40Х після електроіскрового легування вольфрамом та хромом у різній послідовності.

4.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Робота виконувалася на кафедрі Фізики металів КПП ім. Ігоря Сікорського. Планова кошторисна вартість (собівартість) НДР розраховувалась, зважаючи на наступні статті витрат:

- витрати на оплату праці науково-виробничого персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- витрати на матеріали, необхідні для проведення досліджень;
- витрати на енергоносії для проведення досліджень;
- витрати на спеціальне обладнання;
- витрати на послуги сторонніх організацій;
- витрати на службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати.

4.2.1 Витрати на оплату праці

Для розрахунку заробітної плати науково-виробничого персоналу використовуються дані про трудомісткість робіт окремих виконавців та їхні посадові оклади. Також враховується кількість виконавців, їхня кваліфікація та завантаженість роботою на різних етапах НДР.

У даній роботі було задіяно три виконавці: доцент (кандидат наук), провідний інженер та інженер 2 кат. Згідно зі штатним розписом КПІ ім. Ігоря Сікорського на 2020 рік посадові оклади за ЄТС складають:

- доцента – 14 378 грн;
- провідного інженера – 7 652 грн;
- інженер 2 кат. – 6 894 грн.

Середня заробітна плата за день кожного з виконавців розраховується наступним чином: посадовий місячний оклад ділиться на 21,2 – середню кількість днів у місяці. Отже, середньоденна заробітна плата виконавців складає:

- доцента – 678,21 грн;
- провідного інженера – 360,94 грн;
- інженера 2 кат. – 325,19 грн.

У тому разі, коли відповідні розрахункові методики відсутні, трудомісткість різних етапів виконання НДР визначається, спираючись на базу експертних оцінок провідних спеціалістів. НДР при цьому сприймається як сукупність макроетапів. Аналіз кожної окремої операції в цьому випадку не проводиться. Результати експертної оцінки трудомісткості етапів НДР наведені в табл. 4.1.

Обсяг фонду заробітної плати виконавців (ФЗП) розраховується наступним чином: добутки трудомісткості та середньоденної заробітної плати кожного робітника сумуються.

$$\text{ФЗП} = 12 \times 678,21 + 57 \times 360,94 + 38 \times 325,19 \approx 41\,070 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання НДР

Макростапи НДР	Трудомісткість за виконавцями, люд.-дні		
	Доцент	Провідний інженер	Інженер 2 кат.
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	2	—	—
2. Аналіз науково-технічних публікацій по темі дослідження	—	16	—
3. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	—	2
4. Розробка методики проведення дослідження	2	6	6
5. Проведення дослідження	—	20	30
6. Обговорення результатів НДР	6	15	—
Усього	12	57	38

4.3.2 Єдиний соціальний внесок

Згідно з чинним законодавством єдиний соціальний внесок складає 22 % від заробітної плати та обчислюється за формулою:

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \times 0,22, \quad (4.1)$$

де ЗП – загальні витрати на заробітну плату.

Наразі ЄСВ буде становити: $\text{ЄСВ} = 41\,070 \times 0,22 = 9\,035,40$ грн.

4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Для здійснення досліджень було виготовлено 4 зразків сталі 40Х та 8 вольфрамових та хромових анодів. Вартість використаних матеріалів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Сталь 40Х	ГОСТ 7417-75	кг	0,5	32,50	16,25
Вольфрам	ГОСТ 29103-91	кг	0,5	309,10	154,55
Хром	ГОСТ 5905-2004	кг	0,5	160	80
Усього					250,80

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10 % від планової вартості загальних витрат на матеріали: $T_B = 250,80 \times 0,1 = 25,08$ грн.

Загальна сума витрат на закупівлю матеріалів та їх транспортування буде становити: $V_M = 250,80 + 25,08 = 275,88$ грн.

4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання

Проведення дослідів даної НДР не потребувало придбання додаткового спеціального обладнання. Всі роботи виконувалися із застосуванням обладнання, наявного в лабораторіях КПП ім. Ігоря Сікорського.

4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій

Проведення дослідів даної НДР не потребувало участі сторонніх організацій.

4.2.6 Витрати на службові відрядження

Проведення дослідів даної НДР не потребувало службових відряджень штатних працівників.

4.2.7 Інші прямі невраховані витрати

Ця стаття витрат приймається у розмірі 10 % від врахованих.

$$I_B = (ЗП + ЄСВ + V_M) \times 0,1 \quad (4.2)$$

Наразі I_B буде становити:

$$I_B = (41\,070 + 9\,035,40 + 275,88) \times 0,1 = 5\,038,13 \text{ грн.}$$

4.2.8 Накладні витрати

Накладні витрати включають витрати на заробітну плату персоналу, який був опосередковано задіяний у виконанні досліджень, витрати на амортизацію основних засобів, витрати на утримання та експлуатацію виробничих площ, наукових приладів та установок, витрати на науково-технічну інформацію, витрати на охорону праці, техніку безпеки та екологію, витрати на податки, збори та інші обов'язкові платежі тощо.

Ця стаття витрат приймається на рівні 20 % від суми прямих витрат.

$$H_B = (ЗП + ЄСВ + V_M + I_B) \times 0,2 \quad (4.3)$$

Наразі H_B буде становити:

$$H_B = (41\,070 + 9\,035,40 + 275,88 + 5\,038,13) \times 0,2 = 11\,081,88 \text{ грн.}$$

4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція кошторисної вартості НДР складається за виконаними розрахунками. Результати зазначені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування калькуляційних статей	Позначення	Сума	
		грн	%
1. Фонд заробітної плати	ФЗП	41 070	61,76
2. Єдиний соціальний внесок	ЄСВ	9 035,40	13,59
3. Матеріали, необхідні для виконання теми	В _М	275,88	0,41
4. Спеціальне обладнання	В _{об.}	—	—
5. Послуги сторонніх організацій	В _{стор.}	—	—
6. Витрати на службові відрядження	В _{від.}	—	—
7. Інші прямі невраховані витрати	І _В	5 038,13	7,58
8. Накладні витрати	Н _В	11 081,88	16,66
Усього		66 501,29	100

Згідно з табл. 4.3 загальна планова кошторисна вартість НДР становить:
 $V_{\text{НДР}} = 66\,501,29$ грн.

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

У даній роботі проводилися дослідження, які мають пошуковий та прикладний характер.

Для встановлення річного економічного ефекту використовується бальна система оцінювання економічної ефективності. При цьому враховуються наступні показники коефіцієнтів:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів (K_2);

- теоретичне значення та рівень новизни дослідження (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Нижче описано більш докладно систему оцінки за кожною шкалою.

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями – 5 балів;
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі – 8 балів;
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

- робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;
- під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

- внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;
- внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне – 6 балів;
- отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

- роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень - 1 бал;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень - 3 бали;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень - 5 балів;
- робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень - 7 балів;
- робота виконується багатьма організаціями, витрати більше 200 000 гривень - 9 балів.

Загальна бальна оцінка економічної ефективності розраховується за формулою:

$$B = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \quad (4.4)$$

У нашому випадку загальна бальна оцінка ефективності даної НДР згідно табл. 4.4 складає: $B = 3 \times 8 \times 3 \times 5 = 360$.

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умове позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися споживачі в одній галузі	8
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	K_4	Робота виконується одним підрозділом, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний економічний ефект НДР визначається наступним чином:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \times B - E_H \times B_{\text{НДР}}, \quad (4.5)$$

де 500 – умовна вартість одного балу, грн;

E_H – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3, для нашого розрахунку обираємо $E_H = 0,2$);

$B_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (для даного розрахунку $B_{\text{НДР}}=66\,501,29$ грн).

Отже, умовний економічний ефект даної роботи складає:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \times 360 - 0,2 \times 66\,501,29 = 166\,699,74 \text{ грн.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}} \quad (4.6)$$

У даній роботі E_e складає: $E_e = \frac{166\,699,74}{66\,501,29} = 2,51$.

Отриманий коефіцієнт економічної ефективності даної роботи становить $E_e=2,51$, що свідчить про доцільність виконання цієї НДР.

4.4 Висновки до розділу 4

Було проведено економічні розрахунки та зроблено наступні висновки.

Планова кошторисна вартість даної науково-дослідної роботи становить 66 501,29 грн.

Проведений економічний аналіз доцільності цієї роботи дозволяє стверджувати, що з економічної точки зору дане дослідження є доцільним.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Метою цього розділу є аналізування небезпечних та шкідливих факторів, які мають змогу спричиняти ураження організму людини та створюють умови, що доводять до травмування у процесі електроіскрового легування сталі 40Х анодами W та Cr, а також призначення заходів, які повинні не допустити появи цих факторів.

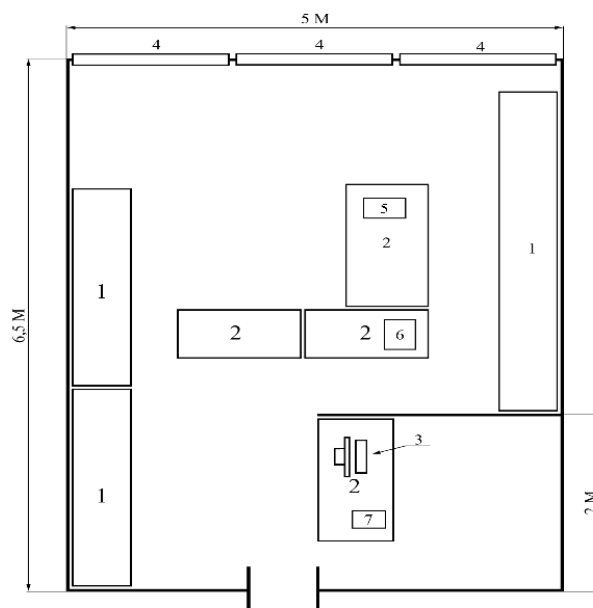
Нижче опрацьовані способи охорони праці у процесі проведення досліджень, які були виконані на установці «Елітрон-26».

Для аналізу умов праці під час проведення практичної частини дипломної роботи було розглянуто такі шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

- електричний струм;
- освітлення;
- мікроклімат;
- випромінювання від комп'ютера;
- вібрації;
- склад повітря робочої зони;
- шум.

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів

Експериментальна частина даної дипломної роботи була виконана в лабораторії № 034 нульового поверху навчального корпусу № 9 кафедри Фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Схему лабораторії із розміщенням усіх її елементів наведено на рис. 5.1. Дана лабораторія має наступні розміри: ширина – 5 м, довжина – 6,5 м, висота – 3,8 м, площа – 32,5 м², об'єм – 123,5 м³. Під час виконання дослідів у приміщенні присутні три працівники. Отже, площа, що припадає на одну людину, – 10,83 м², об'єм – 41,17 м³. Таким чином, габарити лабораторії відповідають нормам [43].



1 – шафа; 2 – стіл; 3 – обчислювальна техніка; 4 – вікна; 5 – ПМТ-3М;
6 – «Элитрон – 26А»; 7 – МІМ-8М

Рисунок 5.1 – Схема лабораторного приміщення, в якому проводилися дослідження

5.1.2 Мікроклімат

Для нормальної та комфортної працездатності людини необхідна наявність чистого повітря з оптимальними температурою, вологістю та швидкістю переміщення.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99, дані роботи відносяться до категорії Іб легка (роботи, які виконуються сидячі, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деякими фізичними напруженнями). При виконанні робіт такої категорії енерговитрати становлять 121 ккал/год - 150 ккал/год [44].

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 допустимі умови праці для робіт даної категорії становлять у холодний період року: температура 20 °С - 24 °С, відносна вологість до 75 %, швидкість руху повітря до 0,3 м/с; у теплий період року: температура 21 °С - 28 °С, відносна вологість до 65 %, швидкість руху повітря до 0,3 м/с. За результатами вимірів зафіксовано, що у робочій зоні

лабораторії № 034 температура у холодний період року дорівнює 5 °С, відносна вологість 70 %, швидкість руху повітря 0,1 м/с; у теплий період року ці параметри мають такі значення: температура 15 °С, відносна вологість 55 %, швидкість руху повітря 0,2 м/с.

Вищезазначені дані свідчать, що мікроклімат у лабораторії не відповідає допустимим умовам праці.

5.1.3 Шум

Для даної науково-дослідної роботи була використана установка «Елитрон – 26А», яка спричиняє певне шумове навантаження. Іншим джерелом шуму була оригінальна машина тертя для визначення зносостійкості.

Шум може бути причиною біологічних подразнень, патологічних змін, механічних ушкоджень. При роботі в умовах підвищеного шуму ефективність фізичної роботи знижується на 40 %, а розумової – на 50 % [45]. Якщо робота в шумних умовах триває надто довго, першими шкідливий вплив зазнають нервова та серцево-судинна системи, а також органи дихання.

Допустимі діапазони шуму на робочих місцях нормуються ДСН 3.3.6.037-99.

Під час виконання досліджень працівник піддається впливу імпульсного шуму. Через те, що установки вмикаються рідко, для індивідуального захисту від шуму достатньо використовувати протишумові вкладиші для слухових проходів.

5.1.4 Освітленість

Освітлення, підібране відповідно до норм [46], справляє позитивний вплив на організацію робочого процесу. Існує три типи освітлення: природне (розсіяні на небосхилі або прямі сонячні промені); штучне (освітлення

електричними пристроями) та суміщене (недостатня кількість природного освітлення компенсується штучним). Природне освітлення також має свою класифікацію: бокове (одно- або двобічне), верхнє та комбіноване. Штучне освітлення у свою чергу може бути загальним, місцевим та комбінованим.

Неправильно підібране освітлення, його нерівномірність, надмірність або недостатність у полі зору людини спричиняють погіршення стану здоров'я, ведуть до зниження ефективності праці та розсіювання уваги, що може стати причиною нещасних випадків.

Коли освітлення на робочих місцях розраховано і підібрано правильно, то очі працівників можуть зберігати здатність чітко розрізняти предмети і знаряддя праці достатньо довгий час. При такому освітленні зменшується виробничий травматизм і кількість професійних захворювань очей.

Більш прийнятним є природне освітлення, до переваг якого відносять сприятливий вплив на органи зору та здатність покращувати розвиток організму. Але воно має певні недоліки: непостійність інтенсивності, нерівномірність розподілу по площині, може засліплювати [45].

Допустимі норми природного та штучного освітлення вказані у ДБН В.2.5.28-2006 і залежать від розряду зорової роботи (I-VIII), характеристики фону, найменшого розміру об'єкта розрізнення, системи освітлення, контрасту об'єкта розрізнення з фоном, характеристики зорової роботи.

У лабораторії № 034 застосовується природне бокове освітлення (вікна знаходяться з північного боку) та штучне освітлення. Цей тип освітлення називається суміщений. У випадку нестачі природного освітлення воно компенсується штучним. Виконувані роботи класифікуються як роботи середньої точності (четвертий розряд зорових робіт). Для місцевого штучного освітлення застосовують лампи розжарювання, для загального – люмінесцентні ЛБ-40 (24 одиниці), які розташовані на стелі [45].

5.1.5 Електробезпека

Згідно з діючими правилами побудови електроустановок ПУЕ-2017 з погляду небезпеки враження людини електричним струмом приміщення лабораторії має бути віднесеним до приміщень без підвищеної небезпеки електротравм, які мають струмонепровідну підлогу та температуру повітря 18 °С - 25 °С. Під час виконання даної НДР застосовувалися електроприлади, які живляться від мережі з напругою 220 В та частотою змінного струму 50 Гц.

Причини ураження електричним струмом можуть бути такими:

- відсутність засобів захисту струмопровідних частин;
- помилкове включення електричних приладів при проведенні ремонтних робіт;
- пошкодження ізоляції неструмопровідних частин електроприладів;
- недбале ставлення до вимог безпеки праці.

Останній пункт може мати трагічні наслідки. Ймовірність летального результату при ураженні електричним струмом є однією з найвищих.

Наслідки електричної поразки можуть бути різними в залежності від дії наступних факторів:

- величини струму;
- частоти та роду струму;
- тривалості дії струму;
- стану організму;
- шляху струму в організмі.

Безпечним вважається струм, який має наступні параметри: частота 50 Гц, напруга 2,0 В, сила струму 0,3 мА. Якщо струм має значення 25 мА, людині важко самотійно відірватися від провідника, а при величині струму 100 мА виникає загроза життю. Також найбільш небезпечною частотою вважається частота вище 50 Гц.

У приміщенні лабораторії, де відбувалися дослідження, застосовано захисне заземлення корпусів приладів та електроустаткування. В наслідок

правильного розміщення робочих місць попереджається ймовірність дотику до корпусів приладів та електроустаткування.

5.1.6 Запиленість та загазованість

Під час виготовлення шліфів на механічному верстаті виникає неорганічний пил зі сполукою кремнію та оксид хрому Cr_2O_3 (при поліруванні пастою «ДОІ» у мокрому середовищі). Останнім етапом підготовки шліфів є їх травлення. При цьому використовуються етанол для знежирення та 3 % розчин азотної кислоти у спирті для самої процедури травлення.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин регламентуються ГОСТ 12.1.005-88 та мають наступні значення: пил з діоксидом кремнію до 4 % – ГДК = 4 мг/м³, клас 3; оксид хрому – ГДК = 1 мг/м³, клас 2; етанол – ГДК = 1000 мг/м³; азотна кислота – ГДК = 5 мг/м³. При вимірюванні концентрації даних речовин було отримано такі дані: пил з діоксидом кремнію до 4 % – 8 мг/м³, оксид хрому – 0,25 мг/м³, етанол – 800 мг/м³, азотна кислота – 3 мг/м³.

Із наведених вище даних видно перевищення концентрації пилу з діоксидом кремнію до 4 % гранично допустимих. З огляду на нетривалість процесу шліфування та полірування, для безпечної роботи буде достатнім застосування засобів індивідуального захисту – ШБ1 «Лепесток 5». У процесі травлення шліфів гранично допустимі концентрації не перевищуються, тому немає потреби у використанні засобів індивідуального захисту.

5.1.7 Виробниче випромінювання

Норми виробничого випромінювання регламентуються ДСанПіН 3.3.2-007-98 [47].

Під час роботи з ЕОМ, яка є частиною устаткування, на людину чинять вплив наступні фактори: ультрафіолетове випромінювання, електростатичне поле, невикористане рентгенівське випромінювання (НРВ).

Для запобігання негативних наслідків встановлено такі норми: потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання не повинна перевищувати $2,78 \times 10^{-12}$ мкР/с (100 мкР/год) у будь-якій точці на відстані 5 см від зовнішньої поверхні, яка обернена до оператора; потужність експозиційної дози НРВ у будь-якій точці простору на відстані 5 см від корпусу установки не повинна перевищувати 0,07 мкР/с при робочому тижні 41 год.

Зважаючи на те, що робота тільки частково виконувалася за ЕОМ і тривала не більше 4 години за зміну з технологічними перервами, потреби у використанні засобів індивідуального захисту немає.

5.1.8 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 лабораторія № 034 за вибухопожежною та пожежною небезпекою належить до категорії «Г», оскільки в ній знаходяться негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я, а також горючі гази, спалимі рідини, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо [48]. Місцем, де присутня найбільша вірогідність виникнення пожежної небезпеки в лабораторії, є місце прокладення електропроводки. Коротке замикання у ній може бути причиною загоряння.

У разі виникнення пожежі у лабораторії присутній план евакуації, зображений на рис. 5.2. Також лабораторія обладнана засобами пожежогасіння у вигляді вогнегасників ОУБ-2, засобами виявлення та оповіщення про пожежу у вигляді датчиків-сигналізаторів типу ДТП, а також засобом комунікації та оповіщення про пожежну ситуацію, яким є внутрішньо-службовий зв'язок.

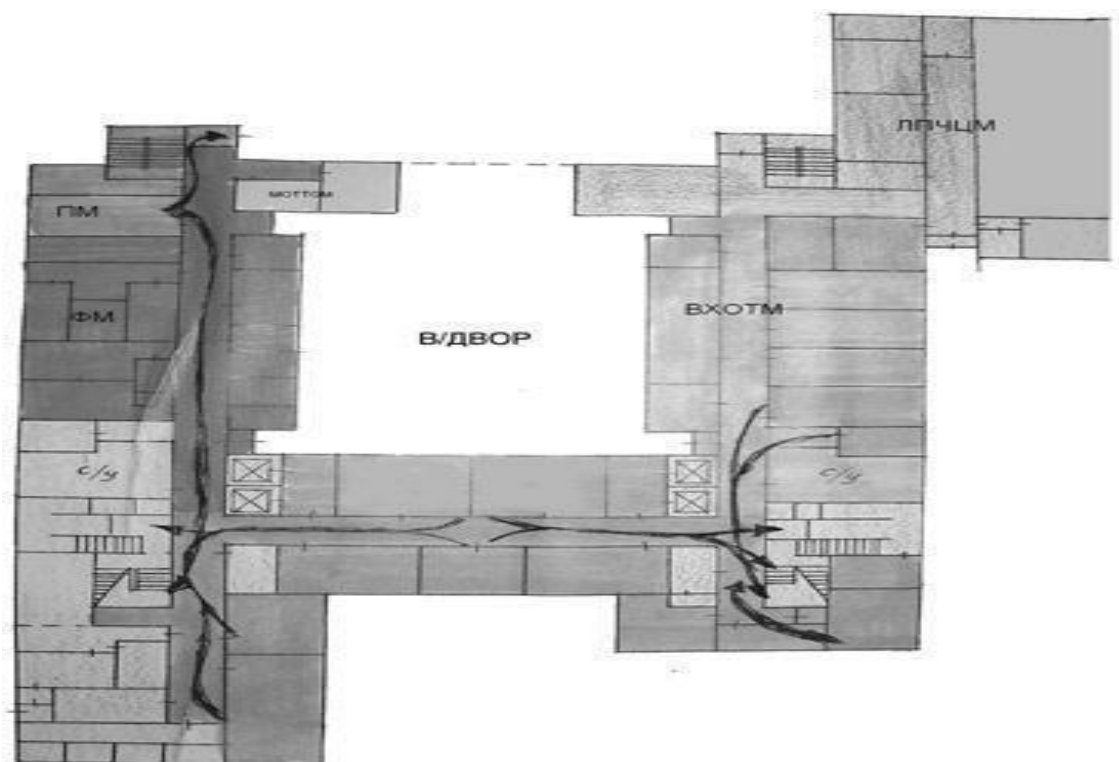


Рисунок 5.2 – План евакуації з лабораторії № 034

5.2 Висновки до розділу 5

Було проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів та зроблено наступні висновки.

Дослідження, які проводилися в даній роботі згідно плану, є екологічно чистими та не забруднюють навколишнє середовище.

Мікроклімат, шум, освітлення, електробезпека, запиленість та загазованість, виробниче випромінення та пожежна безпека в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм та не перевищує допустимих концентрацій.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено можливість створення зміцнених покриттів на сталі 40Х при електроіскровому легуванні Cr та W у різних послідовностях.

2. Показано вплив послідовності ЕІЛ Cr та W на мікротвердість та зносостійкість легованого поверхневого шару. Електроіскрове легування при послідовності W - Cr приводить до мікротвердості 10,5 ГПа та зростанню зносостійкості у 7,3 рази у порівнянні з необробленим зразком, а при послідовності Cr - W приводить до меншої мікротвердості – 6,3 ГПа, а зносостійкість зростає лише у 2,75 рази у порівнянні з необробленим зразком.

3. З'ясовано, що послідовність нанесення W та Cr в процесі електроіскрового легування сталі 40Х впливає на товщину легованого поверхневого шару. При послідовності ЕІЛ W - Cr товщина складає 24 мкм, тоді як послідовність Cr - W дає більшу товщину легованого шару – 32 мкм.

4. Спираючись на економічний аналіз, встановлено економічну доцільність даної науково-дослідної роботи.

5. Проведений аналіз шкідливих та небезпечних факторів показав, що мікроклімат, шум, освітлення, електробезпека, запиленість та загазованість, виробниче випромінення та пожежна безпека в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм та не перевищує допустимих концентрацій.

CONCLUSIONS

1. The possibility of creating reinforced coatings on 40X steel with electro-spark alloying with Cr and W in different sequences has been established.

2. The influence of ESA with Cr and W sequences on the microhardness and wear resistance of the doped surface layer is shown. Electro-spark doping at the sequence W - Cr leads to a microhardness of 10.5 GPa and an increase in wear resistance of 7.3 times compared to the untreated sample, and at the sequence Cr - W leads to a microhardness of 6.3 GPa, and wear resistance increases only by 2.75 times compared to the untreated sample.

3. It was found that the sequence of application of W and Cr in the process of electro-spark alloying of steel 40X affects the thickness of the alloyed surface layer. With the sequence ESA W - Cr thickness is 24 μm , while the sequence Cr - W gives a greater thickness of the doped layer – 32 μm .

4. Based on the economic analysis, the economic feasibility of this research work is established.

5. The analysis of harmful and dangerous factors showed that the microclimate, noise, lighting, electrical safety, dust and gassiness, industrial radiation and fire safety in the laboratory meet the requirements of sanitary norms and do not exceed the permissible concentrations.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Из истории электроискровой обработки материалов [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: <https://sodick.sodicom.biz/2015/wp-content/uploads/2018/10/BorisStavitskii-%D0%904.pdf>, свободный. – (дата обращения: 02.02.2020). – Заголовок с экрана.
2. Лазаренко Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко – М.: Машиностроение, 1976. – 47 с.
3. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 320 с.
4. Повышение эффективности поверхностного упрочнения при электроискровом легировании деталей машин / Б. И. Лукичев, Ю. А. Белобрагин, С. В. Усов [и др.] // Электронная обработка материалов, 1987. – №4. – С. 22–25.
5. Ким В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изношения режущего инструмента / В. А. Ким – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 199 с.
6. Кинетика обратного массопереноса при электроискровом легировании и формирование вторичной структуры на аноде / А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, Л. Н. Куриленко, Л. П. Половцев // Физика и химия обработки материалов, 1986. – №4. – С. 65–68.
7. Лубан Р. Б. О возможном механизме массопереноса при электроискровом легировании металлов / Р. Б. Лубан, Л. С. Пеккер // ЭОМ, 1991. – №8 – С. 13–15.
8. Иванова Е. В. Феноменологическая модель электроискрового легирования / Е. В. Иванова // Статья в сборнике трудов конференции:

“Качество в производственных и социально-экономических системах”, 2016 – С. 183–185.

9. Mulin Yu. I. Phenomenological description of regularities of surface layers formation under electric – spark alloying / Yu. I. Mulin, L. A. Klimova, D.V. Yarkov // Article, 2000.

10. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Б. Р. Лазаренко, В. С. Коваленко, А. Д. Верхотуров, Л. Ф. Головкин, И. А. Подчерняева – М.: Наука, 1986. – 276 с.

11. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

12. Лазаренко Б. Р. Электроискровая обработка токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко – М.: изд. АН МССР, 1959. – 183 с.

13. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров, Г. А. Бовкун, В. В. Сычев – К. Наук. Думка, 1976. – 220 с.

14. Ковришкін М. О. Методи формування покриттів на різальному інструменті / М. О. Ковришкін, О. В. Шевченко, С. О. Довжук // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / Кіровоградський національний технічний університет, 2010 – Вип. 23. – С. 344–351.

15. Zahid Ziyadkhan Sharifov. The anode material selection for electrospark alloying (ESA) and mass transition phenomena / Zahid Ziyadkhan Sharifov, Farid Gurbanov // The international journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation / Azerbaijan State Marine Academy, Baku, 2017 – Volume 11 – №4 – pages 623–626.

16. Лобачова Г. Г. Поверхневе зміцнення сплавів заліза електроіскровим легуванням цирконієм, титаном, хромом та хімікотермічною обробкою: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.01

“Металознавство та термічна обробка металів” / Г. Г. Лобачова. – Київ, 2012. – 20 с.

17. Surface hardening of metallic alloys by electrospark deposition followed by plasma nitriding / M. A. Bejar, W. Schnake, W. Saavedra, J. P. Vildosola // *Journal of Materials Processing Technology*, 2006 – Volume 176 – Issues 1-3 – pp. 210–213.

18. Створення багатокомпонентних функціональних покриттів на сталі Ст.3 пошаровим електроіскровим легуванням вольфрамом, нікелем та графітом / Г. Г. Лобачова, Є. В. Іващенко, Н. А. Шаповалова, А. О. Мазурик. // *КПІ ім. Ігоря Сікорського*. – 2016. – С. 220–221.

19. С. М. Солдатенко Послідовне електроіскрове легування сталі Ст.3 титаном та хромом / С. М. Солдатенко, О. М. Губіна, Є. В. Іващенко // *Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали IV наук.-техн. конф., 25 листопада – 26 листопада 2015 р. / Тернопіль, НТУУ «КПІ», Україна*. – С. 77.

20. Тугоплавкий металл вольфрам. [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <http://www.metotech.ru/volfram-opisanie.htm>, вільний. – (дата звернення: 20.02.2020). – Метотехніка.

21. Диаграмма состояния системы углерод-вольфрам (C-W). [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: <https://markmet.ru/diagrammy-splavov/diagramma-sostoyaniya-sistemy-uglerod-volfram-c-w>, свободный – (дата обращения: 22.02.2020). – Заголовок с экрана.

22. Лякишаев Н. П. Диаграммы двойных металлических систем / под общей реакцией Н. П. Лякишаева – М.: Изд-во Машиностроение, 1996. – Т. 1 – С. 778–779.

23. Nikolenko S. V. Investigation of Coatings Produced by the Electrospark machining method of steel 45 with electrodes based on carbides of tungsten and titanium / S. V. Nilolenko // *Properties of metals and physical chemistry of surface*, 2017 – 53 (No.5) – pp. 543–549.

24. Влияние электроискрового легирования вольфрамового твердого сплава на его износ и коррозионную стойкость / И. А. Подчерняева,

А. Панасюк, В. А. Лавренко, А. И. Юга, В. И. Березанская / Порошковая металлургия и металлокерамика, 1999. – Том 38. – Вип. 5–6 – С. 250–253.

25. Лякишаев Н. П. Диаграммы двойных металлических систем / под общей реакцией Н. П. Лякишаева – М.: Изд-во Машиностроение, 1996. – Т. 2 – С. 578–580.

26. Nagender Naidu S. V. Phase diagrams of binary tungsten alloys / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, P. Rama Rao // J. Alloy Phase Diagrams, 1986 V.2 N.3 – p. 176–188.

27. Хром как тугоплавкий, но очень полезный в строительстве металл [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: <http://stroyres.net/metallicheskie/vidyi/tsvetnyie/hrom/ponyatie-poleznost-i-osobennosti.html>, свободный. – (дата обращения: 24.02.2020). – Заголовок с экрана.

28. Electrosark graphite alloying of steel surface: technology, properties and application / Viacheslav Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, O. P. Gaponova / Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2018. – 54(2) – p. 147–156.

29. Лякишаев Н. П. Диаграммы двойных металлических систем / под общей реакцией Н. П. Лякишаева – М.: Изд-во Машиностроение, 1996. – Т. 1 – С. 711–512.

30. Бобырь С. В. Фазовые и структурные превращения в богатых железом сплавах системы Fe – C – Cr / С. В. Бобырь, Н. И. Репина, П. Д. Грушко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. Научн. Тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2005. – Вип.10. – С. 261–267.

31. Сидоренко С. І. Матеріалознавство і розробка електронної техніки / С. І. Сидоренко, Є. В. Іващенко, Г. Г. Лобачова // Науковий вісник КУЕІТУ, 2013. – №3-4(41-42). – С. 3–7.

32. Лякишаев Н. П. Диаграммы двойных металлических систем / под общей реакцией Н. П. Лякишаева – М.: Изд-во Машиностроение, 1996. – Т. 2 – С. 118–120.

33. Burkov A. A. / Electrosparck WC – Co coatinngs with different iron concentration / A. A. Burkov // Welding international, 2017 – V. 32(1): 1–4.
34. Oskolkova T. N. Surface hardening of hard Tungsten-Carbide Alloys: A Review // T. N.Oskolkova, A. M. Glezer / Journal steel in translation (Steel translat), 2017. – 47(12) – pp. 788–796.
35. Металлургический словарь. Шарпи принцип [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: https://metallurgy_dictionary.academic.ru/3831/%D0%A8%D0%90%D0%A0%D0%9F%D0%98_%D0%9F%D0%A0%D0%98%D0%9D%D0%A6%D0%98, свободный. – (дата обращения: 25.03.2020). – Заголовок с экрана.
36. Характеристики марки стали 40X [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: <https://metinvestholding.com/ru/products/steel-grades/40x>, свободный. – (дата обращения: 26.03.2020). – Заголовок с экрана.
37. Сталь 40X [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: <https://taktmetal.com/steels/40h>, свободный. – (дата обращения: 17.03.2020). – Заголовок с экрана.
38. Сталь 40X (ХА) конструкционная легированная качественная [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: <https://mmetallurg.ru/marochnik-stali/konstrukczionnaya/uglerodistaya-obyiknovennaya/40x/>, свободный. – (дата обращения: 26.03.2020). – Заголовок с экрана.
39. Физические методы восстановления деталей [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: https://studopedia.su/15_184645_elektroiskrovoye-legirovanie.html, свободный. – (дата обращения: 21.03.2020). – Заголовок с экрана.
40. Лазаренко Б. Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – №3. – С. 12–16.

41. Микротвердомер ЛОМО ПМТ-3М [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.lomo-microsystems.ru/Pmt-3M.html>, свободный. – (дата обращения: 14.04.2020). – Заголовок с экрана.

42. Микроскопы металлографические агрегатные ЕС МЕТАМ РВ [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: http://granat-e.ru/ec_metam_rv.html, свободный. – (дата обращения: 15.04.2020). – Заголовок с экрана.

43. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98 [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/40949/doc-%D0%94%D0%A1%D0%B0%D0%9D%D0%9F%D1%96%D0%9D_3.3.2-007-98, вільний. – (дата звернення: 02.06.2020). – Назва з екрана.

44. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99 [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>, вільний. – (дата звернення: 02.06.2020). – Назва з екрана.

45. Голінько В. І. Основи охорони праці: підручник / В. І. Голінько ; Дніпропетровськ. нац. гірн. ун-т. – 2-ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.

46. Основи охорони праці: підручник, 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, [та ін.] ; за ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – К.: Основа, 2006. – 448 с.

47. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98 [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/40949/doc-%D0%94%D0%A1%D0%B0%D0%9D%D0%9F%D1%96%D0%9D_3.3.2-007-98, вільний. – (дата звернення: 02.06.2020). – Назва з екрана.

48. НАПБ Б.03.002-2007 Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (рус) [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные. – Режим доступа: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=48704, свободный. – (дата обращения: 02.06.2020). – Заголовок с экрана.